大话移动通信

丁奇　阳桢◎著



◎ 畅销书《大话无线通信》作者丁奇精心编著的又一力作，为您奉上阅读盛宴

◎ 内容涵盖2G、3G、LTE和4G，与《大话无线通信》相比，更为浅显、全面

◎ 秉承《大话无线通信》一书轻松幽默的写作风格，让您真正体会“快乐学习”



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

数字版权声明

图灵社区的电子书没有采用专有客户端，您可以在任意设备上，用自己喜欢的浏览器和PDF阅读器进行阅读。

但您购买的电子书仅供您个人使用，未经授权，不得进行传播。

我们愿意相信读者具有这样的良知和觉悟，与我们共同保护知识产权。

如果购买者有侵权行为，我们可能对该用户实施包括但不限于关闭该帐号等维权措施，并可能追究法律责任。

大话移动通信

丁　奇　阳　桢　著

人　民　邮　电　出　版　社
北　京



前言

PREFACE

对于踏入通信行业的人而言，通信的专业知识可谓绝大多数人的苦主。在学校里，我们要被《信号与系统》、《通信原理》、《电磁场与电磁波》等课程反复蹂躏。好不容易出了学校走进社会，以为工程实践知识好对付点吧，才发现 GSM、WCDMA、LTE 也没有一盏是省油的灯。

作者本人也在通信圈子里摸爬滚打，也常常为需要学习如此之多而又艰深的通信知识而头痛不已。作者也在图书馆或者网络上读过《OHM 理工系列》、《编码的奥秘》、《笑傲江湖之三层交换》等书籍或文章，这些书籍或文章由浅入深，非常轻松活泼，很对作者胃口，于是希望通信的圈子里，也多一些这样的内容，而不都是一板一眼的写作方式。遗憾的是，这样的愿望也一直未能如愿。

于是，作者在学习和工作中也有所思有所想，在 C114（通信人家园）上以《无线通信原理通俗解读》为主题进行连载，该帖子目前点击量已过百万，反响热烈超乎作者预期。后来该帖内容经过整理，汇成《大话无线通信》一书在人民邮电出版社出版，依然颇得读者好评，成了当当网 2010 年度最畅销的通信类图书，并获得了畅销图书奖。但《大话无线通信》是以 GSM 为主体来对无线通信进行描述的，很多读者希望了解 WCDMA 是怎么回事，与 TD-SCDMA 有什么区别，为什么 LTE 又放弃了 CDMA 的多址方式，转而投向了 OFDM，这便是作者写作本书的初衷。

本书写作尽量坚持 3 个原则。第一是类比，接触一个不熟悉的知识，最为快捷而一针见血的做法就是将其类比为已经熟悉的知识；第二是通俗，尽量轻松活泼一些，晦涩生硬的文章会让读者看得打瞌睡；第三是知其然还要知其所以然，尽量避免先摆结论后论证的传统讲述方式，而是和读者一起去发现无线通信应用中都会出现哪些问题，然后我们可以采用怎样的方式来解决，这其实也是很多新技术出现的由来。

本书共分为 10 章。第 1 章用粗线条勾勒了一个通信系统的架构，主要的目的是告诉读者声音是如何变成比特流，比特流又是如何还原成声音的，这是通信最本质的东西。学习这些东西能体验到单纯学习工程技术知识所难以体会到的“美感”。应当说在第 1 章中我们告诉了大家两个对讲机是怎样工作的，但是这还不够，手机不是对讲机，它要

复杂的多，第 2 章就是告诉大家手机比对讲机复杂在哪里。第 3 章讲解的是 GSM 网络。在这一章里，我们勾勒出了移动通信网的基本形状，大家很快会发现，其他无线通信网都脱胎于这个模子。第 4 章介绍了 WCDMA 网络。这一章介绍了码分多址的基本概念，这很重要，是三大 3G 标准的基础，而码资源的分配是另一个重要的命题。第 5 章和第 6 章分别介绍了 TD-SCDMA 和 cdma2000。在这两章里，主要介绍了这两大标准与 WCDMA 的异同。3G 三大标准有很多相似之处，对比起来学习会事半功倍。第 7 章和第 8 章介绍的当下正热的 LTE 和 LTE-Advanced。LTE 和 LTE-Advanced 使得无线下载速率分别达到 100Mbit/s 和 1Gbit/s 的量级，使得“无线的宽带化”成为可能。第 9 章介绍的是 3GPP 组织。从 GPRS 到 EDGE，再从 WCDMA、TD-SCDMA 到 LTE、LTE-Advanced，这个组织都功不可没，让我们来看看通信标准背后的推动力量。第 10 章介绍了一些初步的网规网优知识。这部分知识对于运营商的工作人员和希望了解运营商工作的人而言，都非常重要。

读者在阅读本书的时候，可以把全书分为 4 部分来阅读。第 1 章到第 3 章是无线通信的基本知识，可帮助读者弄清楚无线通信的基本构架和基本流程。第 4 章到第 6 章介绍的是 3G，看起来复杂，其实核心理念就 4 个字母：CDMA。第 7 章到第 8 章介绍的是 LTE 及其后续演进，核心理念也是 4 个字母：OFDM。第 9 章到第 10 章属于全书的延伸阅读。

接下来是致谢。在这里，要感谢宁夏联通总经理彭胜军、湖南联通综合部经理肖智辉、岳阳联通副总经理刘文剑对我的关心与支持。感谢华为公司的技术专家陈爱军、王振世在技术方面给予的指点与切磋，感谢 selena 提出的一些宝贵意见。另外，也要感谢益阳联通李向东、刘鲲、蒋先遵、郑志强、廖坚强、符宾、旷亚宁、曾玲、张肯攀、罗小辉等诸位领导给予的支持。

最后要感谢我的编辑刘洋先生长期以来对我的支持和鼓励，以及对作品精益求精的态度，这使我从中获益良多。

由于作者水平有限以及时间仓促，书中错误和不当之处在所难免，敬请广大读者和同行专家批评指正。本书编辑邮箱：liuyang@ptpress.com.cn。

作　者

目录

Contents



目录

Contents



目录

Contents

目录

Contents



目录

Contents

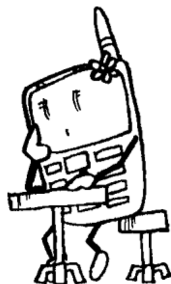


目录

Contents

第 1 章

Chapter 1



点对点的无线通信—从贝尔到莫尔斯

无线通信的知识有两种，一种谓之“道”，另一种谓之“术”。

“术”的层面的内容是广大工程师经常要用到的，我们敲打着冰冷的键盘，查看着GSM 或是 WCDMA 网元的拓扑结构，处理单板故障，分析信令流程，我们手里捧着操作说明书、培训教材或是 3GPP 协议。其实在这些操作规则和通信协议的背后，都隐藏着一种叫做“道”的东西，它深刻揭露了通信的本质，展现了通信的美学。

“道”又包含了两个层面的内容。一个层面的内容叫做“通信原理”，具体一点来说可以由大学里的若干门课程组成，比如“信号与系统”、“随机过程分析”、“电磁场与电磁波”、“无线通信原理”，这些课程告诉我们一些最本质的东西，如声音如何变成比特流、比特流如何承载在电磁波上、多宽频谱的电磁波在既定信噪比的情况下最多只能承载多少信息。另一个层面的内容叫做“管理”，管理的本质就是在既定约束资源的条件上追求最大产出，而放到无线通信上，那么就是要在既定带宽（比如 200kHz 或者 5MHz）的情况下追求最多用户可以打电话或者下载东西的速率怎样做到更快。

本书的主要目的是介绍“术”，就是讲解如何快速了解一个通信系统，比如说 GSM、CDMA、WCDMA、TD-SCDMA；但是介绍“术”的同时，如有可能，也尽量去揭示一下它背后隐藏的规律和蕴涵的智慧，无论是“原理”层面的还是“管理”层面的。

具体到第 1 章，就是想先介绍一下“原理”层面的内容，也就是讲述一下声音是如何通过本端“**对讲机**”转换为比特流并通过电磁波传送到对端“**对讲机**”的。大家注意一下，“**对讲机**”和“**手机**”是有本质区别的，前者只是一个点对点的通信，而后者中间可是有一个庞大的通信网络。但前者却是后者的基础，没有点对点的通信，就不会有移动通信网。所以我们的第 1 章，就从点对点的无线通信开始，这部分内容属于大学课程



里“通信原理”的范畴，数学知识很多，非常复杂，本书为了方便读者阅读，只介绍最基础的内容，以便于读者能快速了解个梗概。

1.1 古代通信的智慧与烦恼

纸笺墨香的时代正在悄然离我们远去，8 毛一张的邮票也渐渐变成了收藏品。所以一提起“通信”这个词，在我们大脑中首先跳出来的词大概就是手机、3G、短信这些人们日常生活中用得最多的东西。但是在进入正题之前，我们不妨先来回溯一下中国历史上的一些通信手段。这样做有两个目的：一是可以了解一下通信系统是如何随着人类的生活半径而变化的。比如元谋人时代，是没有驿站的，因为大家都在周边打转；而现在，也没有银河系通信系统，因为人类的足迹最远也就到过月球。二来古人是很聪明的，连中继、加密等现代通信手段古人也早都用到了，我们也可以从中学到不少智慧。

最早的无线通信应当就是家里人之间的对话了，春秋时期的思想家老子为我们描述了一个理想的上古时代——“鸡犬之声相闻，老死不相往来”。也就是说，你平时的日常活动就局限于那一亩三分地了，跟邻里都没什么交道。说起通信的需求，也就是跟家里人说说话就可以了，都不用很大声，离“通信基本靠吼”都还有一段距离。

细究起来，这个“无线通信系统”和我们现代的无线通信系统还真有不少相似之处。说话的人可以看作发射机，听对方说话的人可以看作接收机，人和人之间采用的语言（汉语、英语乃至法语）可以看作信源编码，承载的物理媒介都是空气……

不同的是，人和人之间传递信号是通过声波而非电磁波。声波就传递这么远，也不需要进行调制，即使你想进行调制，你的声带和喉咙也不会答应，因为它们可没这功能。

另外，人和人之间交流也很少需要信道编码，因为你一般都能听清楚对方的说话。即使偶尔你的“解码”出现问题（你没听清楚对方说话），你的大脑也比那笨笨的接收机要聪明得多，根本不需要进行循环冗余校验（CRC，Cyclic Redundancy Check）就知道你接收的信息不完全、不充分、难以理解，然后你的大脑就丢弃这个信息包，并向发信方申请一个重传——“俺没听清楚，麻烦您再说一遍”。呃，这可是收发信机在数据链路层上经典的检错和纠错机制。

如果说时间就停在这里不再向前也就省事了，人与人之间天然的通信系统已经够用了，不用费尽脑筋再去开发那么多通信系统。然而老子的理想终究没有变成现实，人们不仅要跟邻里打交道，还要跟方圆百里，方圆千里，甚至地球上任何一个角落的人打交道，于是，通信的麻烦就来了！

话说春秋不仅有老子这样无为而治的圣人，也有时刻梦想着封侯拜相、开疆辟土的



野心家，比如说吴起！他要建功立业，他要征伐四方，那他就得有军队，等他组建了军队，问题来了——他发现他嗓门不够大，想吼一嗓子让数平方千米上的几万人的军队都听到他的命令，根本就没有可能。于是，他不得不建立军队的通信系统，以保证每个人都能明白他的将令。于是乎，为了延展他的嗓门，有两种工具就被搬上历史舞台了，那就是金和鼓，大家都知道一句话“闻鼓而进，闻金而退”，这算是一种比较简单的指挥通信系统。但是这个通信系统的信息量太小（假如闻鼓而进用“1”表示的话，闻金而退就是“0”了，总共就 1 个比特的容量），不足以满足指挥作战的需要。假如说你要摆个八门金锁阵，根据敌军的变化来不断改变阵势，这个该怎么办？

对于这个问题，兵圣孙武同学早有见解，他在《孙子兵法》的第五篇《势篇》里有一句话——“孙子曰：凡制众如制寡，分数是也；斗众如斗寡，形名是也。”所谓“分数”，即是对部队进行编号，这样每条命令就能根据编号找到每个独立的作战小单元（这与现代通信有异曲同工之妙，移动通信中的每个通信单元，比如手机、BTS、BSC 都有自己的编号）；所谓“形名”，指的就是旗语，用旗语指挥部队变阵和进行战斗，因为旗帜能往各个方向运动，排列组合无数种，信息量显然大大高于金和鼓。

将士卒整编成行伍队列，以旗语指挥队伍列阵和变阵，闻鼓则进，闻金则退，这就基本组成了一支军队指挥某次战斗的相对完善的通信系统。这个通信系统相比于人和人之间的对话，在通信距离上有了长足的进步，显而易见，无论是鼓点声、敲击金镝的声音，还是旗语，其能传播的范围比人和人之间的对话要大得多。

但是这个系统的缺点也是很明显的，那就是能覆盖的范围依然太有限了，一个再优秀的将领，即使在开阔的地形下，其有效指挥半径也很难超过 5 里路。这就不难理解，为什么古代大的战役几乎都发生在一个很小的区域，而不是像现代战争一样发生在一整条战线上。道理很简单，战争是需要快速做出判断和决策并根据实际情况不断变化的，战线拉长了，指挥系统受制于通信的能力够不着一线部队。所以指挥官为了有效指挥军队，其部队展开的宽度通常不会太宽。我们对比一下古代战争和现代战争就知道了。比如长平之战、巨鹿之战、昆阳之战，这些双方投入总兵力超过 50 万的古代著名战役都以某个地点命名，而到了现代，这个级别的战役往往以区域命名了，比如辽沈战役、淮海战役。通信的发展从某种程度上改变了战争的方式，这句话并不夸张。

这是一定空间范围内的通信，我们可以通过鼓点和旌旗，放大声音的音量和视觉标的的大小，来延展我们的通信距离。可是对于更远的距离，比如长安和雁门，视觉和听觉都无能为力。于是我们在神话中构造出了“千里眼”和“顺风耳”，不过那仅仅是神话，仅仅只能代表人类的一种美好的意愿而已。

在长安和雁门这种超长距离的信息交换中，就当年而言，最要命和最要紧的信息肯定是北方游牧民族入侵的消息。为了及时传递这种信息，烽火台应运而生，通过一站一

站地燃起狼烟来完成自边关向都城的信息传递，“朔方烽火照甘泉，长安飞将出祁连”那是一幅怎样的景象啊。值得注意的是，烽火台和现代通信系统有一个共同的概念，那就是“中继”，光信号会随着距离而衰减，所以每隔一段距离就要建一个烽火台，重新燃起狼烟，相当于把衰减的信号重新放大一次，只有这样，入侵的信号才能从遥远的雁门传到西汉王朝的心脏——长安。与此类似，电磁信号在介质中的传播，无论是 5 类双绞线还是电缆，抑或是空气，都会有衰减和能量损失，因此隔一定的距离也同样需要中继。捣鼓过网络的人都知道，一根网线的距离不能超过 100m，道理和烽火台类似，信号在网线中也是要衰减的，超过 100m 之后，信号衰减所带来的误码会使通信质量下降得令人难以接受。

就通信系统的健壮性和安全性而言，烽火台并不是百分之百值得信赖的。因为一连串烽火台组成的是一条单链，如果其中一个点出现问题，那么整个系统的可靠性将难以得到保障。《三国演义》都称关羽是大意失荆州，其实换个角度来说，他的情报系统（也可以理解为通信系统）是很有问题的，因为直到荆州多地失陷之后，他都并不知道，依然在前线和曹操打得不亦乐乎。情报系统的瘫痪，信息传递的不畅，这才是关羽失荆州的罪魁祸首，我们不妨来看看问题出在哪里。

关羽水淹七军之后，兵锋直指宛洛，曹操慌了，从后方调来了徐晃的援军。关羽为了与之匹敌，被迫将荆州的预备队调往前线。荆州的预备队调走之后，必须要防备东吴入侵，关羽的策略是通过烽火台来传递信息，一有入侵，及时从前线回援荆州即可。诸葛亮的隆中对砸就砸在关羽这一招上头了，因为那该死的烽火台，它居然是一条单链，居然出了问题没有任何保障！

此时的吕蒙已经是饱读诗书、诡计多端的吕蒙了，按他自己的说法，已不再是当年的愣头青“吴下阿蒙”了。这个情报系统的破绽他岂能看不出来。于是吕蒙及其士兵化妆成白衣商人，以躲雨为由进入了荆州防线的一个烽火台，手起刀落解决了守卫，结果荆州整个的预警系统就此失灵，吕蒙趁机攻占江陵，糜芳投降。荆州一丢，关羽进退失据，最终败走麦城。从这个例子我们不难看出，对于一个通信系统而言，出了问题能有备份措施是多么重要，所以现在光缆都提倡双路由，板件都提倡双备份，连操作人员都讲究互相备份，就是为了避免一个单点出问题，整个系统崩溃。

然而，烽火台并不是古代主流的远距离通信系统，虽然这种系统传播速度很快（光速是挺快的，点火也费不了多少时间）。不能成为主流的原因之一是其成本高昂（一是建设烽火台是件成本高昂的事情；二是到处找狼粪也不容易），路径固定且单一（烽火台可不是应急通信车，说开走就开走）。最要命的原因还是烽火台能够传递的信息量实在是太少了，就那么几堆狼粪，横竖排列组合就那么几种。虽然狼烟的原理和旗语颇有几分相似，但是你没法控制狼烟的运动，没法把狼烟搞得像旗语一样千变万化，那你就注定传



递不了更多信息。

中国古代最主流的远距离通信系统毫无疑问是以驿站为基础的“邮局”系统，我们经常在古装影视剧中看到的所谓“八百里加急”就是这玩意儿。这个系统就是骑着马疯狂地赶路送信，遇着驿站就换马以保持行进的速度，看起来似乎没有什么可说的。值得注意的是，这么长的距离，你的信使是完全可能在半路上被劫杀的，这就引发了通信安全的问题。这个问题早在周朝就有解决方案，一为对发送信息进行加密，称为“阴符”；另一种方法和 GSM 中的跳频加密颇为相似，即将信息分为几份，通过不同的人采用不同的路径发送出去，到目的地再合为一起，就算其中一份被截，也不会泄密。以下内容来自太公姜子牙所著《六韬》一书。



《阴符第二十四》

武王问太公曰：引兵深入诸侯之地，三军猝，有缓急，或利或害。吾将以近通远，从中应外，以给三军之用。为之奈何？

太公曰：主与将，有阴符，凡八等。有大胜克敌之符，长一尺。破军杀将之符，长九寸。降城得邑之符，长八寸……

这一段就通信保密而言很经典，武王深入重地，想和大后方传递消息，就问太公咋办。姜子牙说好办啊，咱们对信源重新搞一套编码就是了，比如你杀了对方大将，就不要写“破军杀将”4 个字的小纸条传给俺了，直接让信使送俺一块 9 寸长的木板就行了，这个加密方式只有你和俺知道，不怕泄密。

我们很快就发现，阴符和烽火台一样，面临一个致命的弱点，就是能够传递的信息量太少，或者说编码太少。阴符只能传递 8 种消息，而且很不详细，对于纷繁复杂的战地情况而言显然是不够的。这个时候还没有发明计算机，没有二进制，没有 ASCII 编码，也没有指数和对数，想对每个汉字进行加密简直是个不可能完成的任务。

聪明的周武王很快发现了阴符的弱点，心里开始打鼓，虽说将在外君命有所不受，但是这帮大将领兵在外每天不请示不汇报俺心里实在不踏实，要请示汇报的话 8 个符号实在不够，如之奈何？于是清清嗓子跟太公说我很思念前线的将领，如果想跟他们多说说话，你有没有好的办法呢？（《阴书第二十五》武王问太公曰：引兵深入诸侯之地……其事繁多，符不能明；相去辽远，语言不通，为之奈何？）

姜子牙可是《孙子兵法》里标榜的“上智”人物，何等聪明的人啊，他马上想到了办法，就是仍然用书信，但是将一封书信分成 3 份，由 3 个不同的人通过不同的路线传递，内容分离 3 个人互相不知道内情，即使路上被拦截掉一份，也不会出现泄密的问题，最后这 3 份书信都会传到一个将领手里，这就叫阴书。（《阴书第二十五》太公曰：当用书，不用符……书皆一合再离，三发而一知，此谓阴书。敌虽圣智，莫之能识。）

我们看到，中国古代的人们因为生产生活的需要，随着活动区域的增加逐渐延展了通信系统的距离，从金、鼓、旗语到狼烟、驿站，在通信系统的及时性（烽火中继、八百里加急）、安全性（加密、跳频）、系统性（编号）等方面都有出色的表现。

这些通信系统其所展示的智慧是毋庸置疑的，但是它们也明显存在成本、及时性、传递范围、安全性等多方面的问题。人们一直希望能有一种通信方式，能传播千里，覆盖神州的每一个角落；能传播迅速，如雷鸣闪电一样快，并把这种愿望幻化成了神话，那就是“千里眼”和“顺风耳”。可惜的是，人们一直没有找到这样的通信方式，远方的亲人要通信，依然不得不走驿站或者托人转寄这种高成本的方式。高昂的成本、低效的信息传递造成音讯阻隔，亲人们相思难了，因此杜甫不禁感慨“家书抵万金”。

人们梦想中的通信方式直到 1864 年才初现端倪，在这一年里，麦克斯韦预言了世界上存在这样一种东西，它存在于广袤的天地之间，以光速传播，这种东西被命名为电磁波！麦克斯韦预言电磁波的存在，最终也遭到了学者的怀疑。毕竟电磁波是如此玄妙，无形无影，无法琢磨。

直到 1887 年，赫兹通过实验证实了麦克斯韦关于电磁波存在的预言，一个崭新的电磁世界的大门才向人们打开。但是赫兹只是一位纯粹的科学家，他没有看到这种以光速传播的电磁波所蕴涵的巨大的商业价值——作为话音远距离无线传送的载体。不过人们并没有等太久，1895 年，马可尼发明无线电报机，人类正式进入无线通信时代！

1.2 从“贝尔电话”解剖现代通信系统架构

虽然本书讲述的主要内容是移动通信，第 1 章的主旨也是点对点的无线通信的过程。但是在本节及接下来的章节中，作者依然打算从固定电话入手，勾勒出一个现代通信系统的整体框架。因为固定电话相对移动电话而言比较简单，其实现机理也有很多相似之处。我们首先对整体的架构有个系统的认识，接下来对于具体细节的学习才不至于迷失方向，才不至于陷入盲人摸象的尴尬。

1.2.1 电话之父——贝尔

通信经历了一个从模拟通信到数字通信的发展过程，说起模拟通信，就不能不先提到贝尔（如图 1.1 所示）。亚历山大・格雷厄姆・贝尔是公认的电话之父，以他的名字命名的贝尔实验室更是因为一直引领通信潮流而享誉世界。值得注意的是，贝尔原来是一个话音专业的教授，对发声原理有着深刻的认识，这对他后来发明电话或许不无裨益。有趣的是，发明电报的莫尔斯也非电磁专业的科班出身。莫尔斯 41 岁时还只是一个画家，



他有一次在大西洋中航行的一艘邮船上，听到另一个在电磁学领域同样不靠谱的美国医生杰克逊给旅客们激情澎湃地讲解电磁铁原理，由此激发了他用电流的变化来传递信号的梦想。

12 年后的 1844 年，莫尔斯电报在华盛顿国会大厦联邦最高法院会议厅诞生。俺的神啊，真是有梦想谁都了不起，这个世界太疯狂了！值得注意的是，最早的莫尔斯电报是用有线（电报线）传播的，而并不是像后来一样被广泛用于无线通信领域。

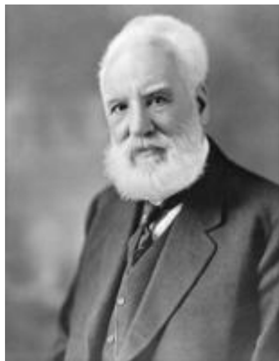


图 1.1　贝尔

牛顿说过，他能取得这么多成就是因为他站在巨人的肩膀人。贝尔同样如此，在他之前，欧洲已经有很多人在进行这方面的设想和研究。早在 1854 年，电话原理就已由法国人鲍萨尔设想出来了，6 年之后德国人赖伊斯又重复了这个设想。原理是：将两块薄金属片用电线相连，一方发出声音时，金属片振动，变成电，传给对方。但这仅仅是一种设想，问题是如何构造送话器和受话器，怎样才能把声音这种机械能转换成电能，并进行传送。

贝尔遇到的第一个挑战——**怎样把声波转化为电信号**？

最初，贝尔试图用电磁开关来形成一开一闭的脉冲信号，但是我们知道，声波的主要频率分布于 20～3 400Hz，对于这样高的频率，企图用机械式的电磁开关来实现信号的转换显然是行不通的。道理不难理解，凡是机械运动必有惯性，要改变物体的运动方向或运动方式必定需要时间，要设计一个每秒以非均匀方式“开—关—开”3 400 次的机械开关，未免太骇人听闻了。

最后的成功源于一个偶然的发现，1875 年 6 月 2 日，在一次试验中，他把金属片连接在电磁开关上，没想到在这种状态下，声音奇妙地变成了电流。分析原理，原来是金属片因声音而振动，在其相连的电磁开关线圈中感生了电流。

图 1.2 就是 1876 年贝尔发明的电话机核心部分的素描简图，椭圆形圆圈所示的部分即电磁信号与声波信号的转换部分，我们可以清晰地看到那片薄薄的金属片。

这个电话显然与我们脑海中对固定电话的印象大相径庭，图 1.2 中所示的部分既没有送话器（话筒）也没有受话器（听筒），这怎么打电话啊。

其实贝尔的设计中是有听筒和话筒的，要不然也不能将其称为电话了。不过样子委实怪异（如图 1.3 所示），您肯定认不出它是电话来，您非要说它是广播，那俺也没办法，谁让它弄了个那么大的话筒呢。

贝尔发明了电话，另一位大发明家爱迪生也没有闲着。1876 年爱迪生发明了炭精式送话器，也获得了发明专利权。炭精式送话器比贝尔永磁式送话器更灵敏。故现代的电话机（如图 1.4 所示），基本上是爱迪生送话器与贝尔受话器的结合。

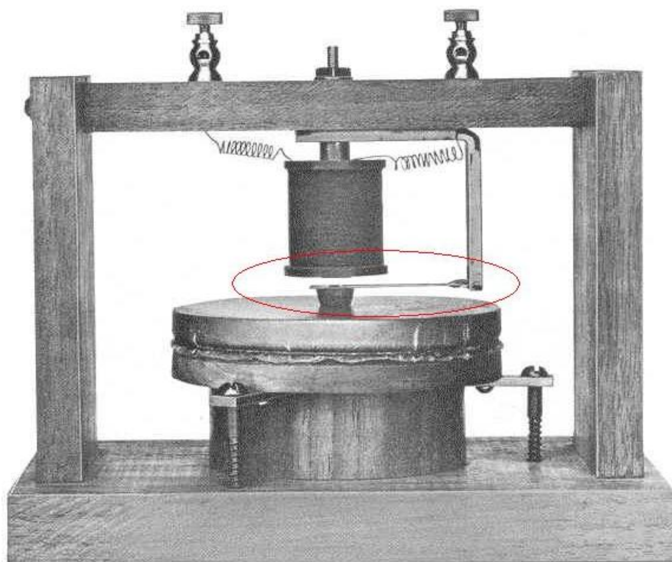


图 1.2　1876 年贝尔发明的电话机的核心部分

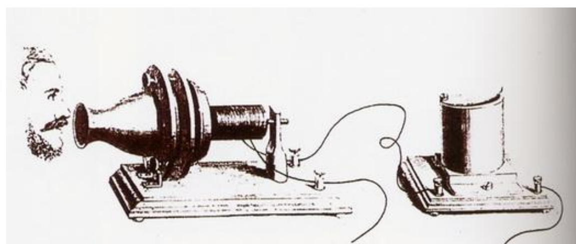


图 1.3　贝尔的第一架电话



图 1.4　现代电话

我们在探讨贝尔电话的时候并没有提到调制，也并没有提到多路电话之间的交换，而这恰恰是现代通信系统中非常重要的环节。之所以不涉及这部分内容，是因为贝尔发明的电话最初用于的是点对点的专线通信，距离也并不长，既不需要调制也不需要进行程控交换，所以我们把这部分内容放到后面的环节来阐述。

1.2.2　解剖固定电话— 模拟通信系统架构

这一节我们希望能从贝尔电话这个具体案例中提炼出更具有一般性的东西，这比生硬地先给出一个框图或许更容易理解。我们把具有连续的随时间变化的波形信号称为模拟信号，话音信号是个典型的模拟信号。通常情况下，影像信号也是模拟信号，当你举起摄像机进行摄影时，通过凹凸镜成像的光学信号的变化当然也是连续的和随着时间变化的。



传输模拟信号的通信系统就可以叫做模拟通信系统，这些系统其实有蛮多的相通性。在本小节中，我们不妨以固定电话为例，对它的五脏六腑进行解剖，看看其内在的运行机理到底是怎样的。

首先，无论是哪种模拟信号，不管是声波也好光学信号也罢，如果你想把它从一个城市实时地传送到另一个城市，你几乎无可避免地都会遭遇**“贝尔挑战”**，即如何把它转变为对应的电信号。

你或许在老师指导的物理课上自制过“电话”，说话的双方各拿一个纸杯既充当听筒又充当话筒，杯底打一个小洞用于系棉线，这根棉线就充当电话线了。把棉线拉得直直的，这两个纸杯还真能凑合当小电话用。

理论源自生活固然不错，如果你凭此就认为声波信号或者光影信号可以直接用于通信，电话可以改名为“声话”或者“光话”的话，那么贝尔估计会气得从地底爬起来，拉上哆啦 A 梦用时光机把你拖到 1876 年，让你捣鼓个“光话”给他用用。

至少人类到目前为止依然没有跳出贝尔的窠臼，遇到任何信号，只要是打算用通信系统将其发送出去并在接收端有效还原为原来的信号，那么第一个遇到的问题依然是**“如何将它转化为电信号？”**

讲到这里，我们渐渐对模拟通信系统的架构有了一个比较清晰的概念。在这样一个系统里，我们首先需要一个输入信号变换器，将模拟信号转换为电信号，就如电话的话筒一样，话筒把话音信号转换为电流信号；通过中间的信道（比如电话线）传输到接收端，又需要把电信号转化为模拟信号，以便于人理解，就如电话的听筒一样，听筒把电磁信号转变为声波信号，因此我们在接收端还需要一个变换器。

由此，我们可以勾勒出一个模拟通信系统的基本框架，如图 1.5 所示。

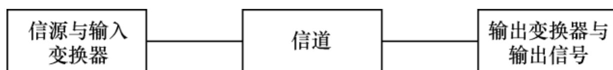


图 1.5　模拟通信系统功能框图（不含调制解调）

图 1.5 所示的模型源于贝尔电话的雏形，并没有考虑到调制，实际上，低频信号并不利于传输，需要将其调制到高频信号上去。具体的原因我们在后面的章节中再进行详细叙述，我们将图 1.5 修正为如图 1.6 所示。

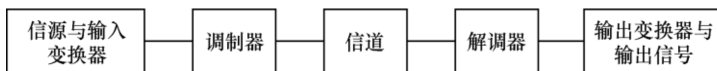


图 1.6　模拟通信系统功能框图（含调制解调）

图 1.6 也还并不是一个完整的通信系统架构图，因为没有考虑到信道乃至发射机、接收机本身产生的噪声。噪声是一个通信系统不得不考虑的因素。噪声与通信系统如影

随行，虽然很令人讨厌，但是却不得不接受它的存在。我们把噪声这个因素考虑进来，就形成了一个相对完整的通信系统架构，如图 1.7 所示。

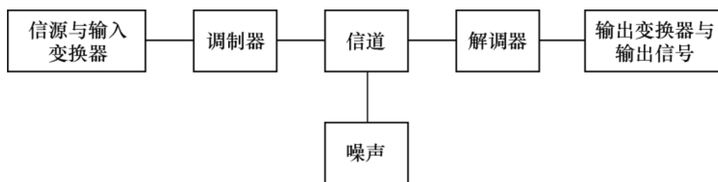


图 1.7　模拟通信系统功能框图

1.2.3 “0”和“1”的时代— 数字通信系统架构

计算机的出现改变了世界，包括通信。计算机及其数字化的信息世界以迅猛的速度发展并席卷全球，这让通信也不得不重新审视一下自己的未来，这个“0”和“1”的世界有那么大魅力么，我是不是也需要把它融合到我的系统里面来呢？

如果要和数字信息技术进行融合，那么首先要解决的就是模拟信号的数字化转换。大家都知道，人类发出的声音是模拟信号，大自然的光和影是模拟信号，那么该怎样把它转换成数字信号呢？

模拟的消息是可以通过数字调制后再进行发送的，所谓调制，就是把一段连续的波形映射成一个或几个数字，比如说把一段一定幅度和相位的正弦波映射成比特“0”。接收端收到这段信号之后，需要对其进行解调，所谓解调，就是另一个映射的过程，也就是收到的“0”映射成上面那段有一定幅度和相位的正弦波，这样就还原成了模拟信号。数字通信系统相对模拟通信系统，无非是在发送端和接收端都增加了一个“模拟—数字”转换模块。这个模块在日常的数码产品中很难用肉眼看到，不像进行“声—电”转换的话筒和听筒那样能给人留下直观的印象。

幸运的是，有一种家电的“模拟—数字”转换模块是独立的，那就是数字机顶盒（如图 1.8 所示）。我们原来的电视都是模拟电视，广电在闭路有线电视线上传输的也是模拟信号，现在正大力推广数字电视，而我们的电视终端却不能直接支持数字信号，所以不得不再在电视上叠加一个数字机顶盒，完成从数字信号到模拟信号的转化。其实在中国，最初推广数字机顶盒的并非是广电而是盛大网络，陈天桥与唐骏当年推出了雄心勃勃的“盛大盒子”计划，然而其产品后来却没有能够得到消费者的认可，最终成了一堆泡影。



图 1.8　数字机顶盒



综上所述，我们给模拟通信系统增加一个“模拟—数字”转换模块，也就是俗称的“编码模块”，这成了数字通信系统的雏形，如图 1.9 所示。

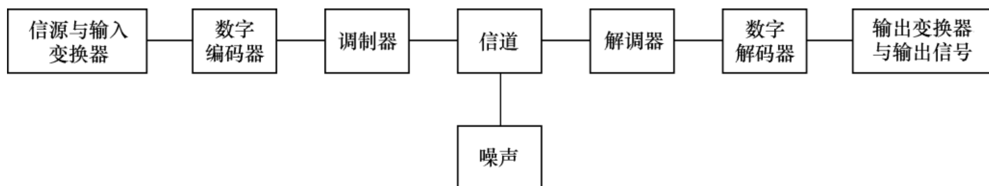


图 1.9 数字通信系统初步功能框图

在数字编码器这个功能模块上，有很多东西其实颇值得玩味。我们希望编码尽量简洁，不要啰唆，尽量减少冗余信息，对这一块内容的研究，我们称之为信源编码。然后，我们发出去的编码一路上会受到噪声的干扰，也许会丢失不少信息。到了目的地后，我们希望接收端可以根据编码所包含的一些内容，对信息的完整性作出一个判断，尽量恢复还原原来的信息，对这一块内容的探讨，我们称之为信道编码。我们就这样把数字编码器拆成了信源编码和信道编码两个功能模块，于是对图 1.9 再进行修正，如图 1.10 所示。

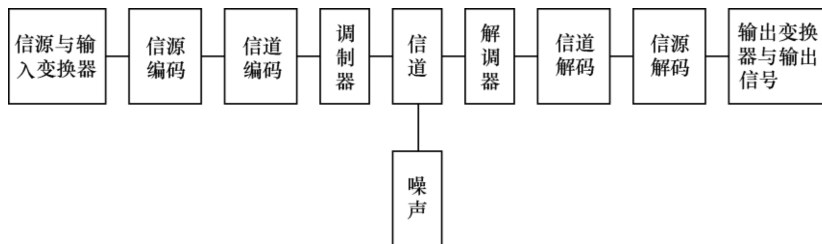


图 1.10 数字通信系统功能框图

调制、信源编码和信道编码都是数字通信中非常重要的概念，在这里，我们只是一笔带过，详细的内容留待后面讨论。

1.2.4 数字通信为何独领风骚

也有人唏嘘模拟通信的辉煌时代已经过去，认为模拟通信才是连续的、无失真的通信。这番话或许不无道理，因为我们知道，模拟信号变为数字信号，第一个关键步骤在于采样。奈奎斯特定理已经证明了当采样频率大于两倍带限信号带宽时，信号可以完全由其采样样本来恢复。然而我们知道，冲激采样在物理上是不可实现的，即使是零阶保持采样也不可能真正实现，因此在采样环节上不可避免地存在失真。其次，采样之后得到的电平值，还必须经过量化，数字通信系统是无法处理无限多个电平值的，必须要将其按区间划分，变成有限多个电平值，才能转变为数字。在量化这个环节，也同样不可

避免地存在失真。

实际上，在我们的生活中，也的确存在模拟通信系统优于数字通信系统的情况。比如说，电影一般而言是采用胶片拍摄的，胶片能够更加细腻地体现场景的细节和氛围，在色彩、光线变化、影调等各个方面都比数码能包容的程度更高。光学摄像机就是典型的模拟通信系统，它的原理是通过凸透镜将光信号在胶片上成像。优质胶片的成像质量目前还是优于数码产品的，只是它们的价格十分高昂。

然而在现代社会中，数字技术的应用却远远超过了模拟技术。大哥大被小巧的 GSM 手机踢进了博物馆，磁带被 CD 扔进了垃圾堆，就连模拟电视也即将被数字电视所取代。我们不禁要问，数字通信系统到底有什么好，为何俨然有一统江湖之势？

数字通信相对于模拟通信，其最大的一个优点在于噪声的处理。数字信号的码流只有高低两个电平，容易进行区分，同时可以在信道编码的过程中插入很多冗余的信息来提高信道传输的可靠性，而模拟通信技术由于不具备信道编码技术，在差错控制方面和数字技术差距较大。

数字通信的这个优点在长距离通信时显得尤其重要。数字传输允许对数字信号进行再生处理，这样就可以在每个再生节点消除噪声的影响（如图 1.11 所示）。而与此相反，长距离传输中叠加到模拟信号上的噪声会随着模拟信号电平的周期性放大而逐次累积（如图 1.12 所示）。

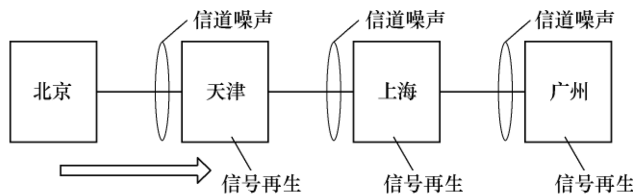


图 1.11　数字信号的消噪处理

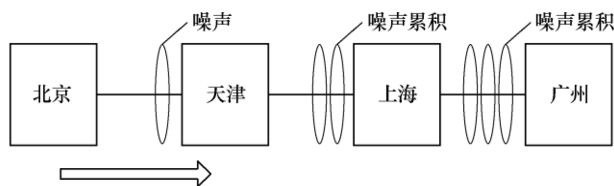


图 1.12　模拟信号噪声的累积

数字系统的另一大优点是便于保密，我们可以对基带信号进行人为的扰乱以实现加密。比如说面对“00110100110001”这么一长串二进制比特，我们可以对其和一串伪随机序列“01011100101001”进行逻辑运算。如果第三方要知道原来的信息，他就必须知道所采用的算法和伪随机序列，这个难度是很大的。当然这里的加密算法仅仅是一个二进制加法，未免显得过于简单，实际应用中的加密算法比这个要复杂得多。



了解了模拟通信系统和数字通信系统的梗概之后，我们从电话机的话筒开始，再来看一点更具体的东西，为了简单起见，下面的章节中就把这个受话器称为“贝尔话筒”。为什么从这里开始？**因为它是一个话音信号历经整个通信系统过程中的起点**。

1.3 “贝尔话筒”的工作之一—　接收信号

说起来，“贝尔话筒”的工作其实也非常简单，就是接收我们的话音信号，然后对这个信号进行分析，要是数字手机，比如 GSM 或者 WCDMA 的任意一款手机，那就还需要把模拟信号转换为数字信号。但是在了解信号的分析过程和“模拟—数字”转换过程之前，我们必须得明白什么是信号，信号有什么特点，然后才谈得上分析和转换。

1.3.1　何谓信号—　从狼烟到电磁波

几乎所有与通信有关的教材类书籍的开篇都是讲“信号”。如果不是，那么一定会在前言里注明——“本书的读者应当具备‘信号与系统’的相关知识”。以“信号”作为通信最基础的知识是很自然的，信号承载了人们所要传递的信息，可谓“无信号，不系统”，如果都没有信号要传递，那么现代的各种通信系统也就失去它的意义了。

那么什么是信号？什么是系统？很简单，通信系统承载的信息流就是信号。“鸿雁传书”，鸽子腿上绑着的情书就是信号，这识路的鸽子就是这对情侣的通信系统；“烽火连三月”，烽火台上燃起的狼烟所代表的入侵信息就是信号，这一站接一站的烽火台就是古代特殊的战争通信系统。所谓的信号与系统既不神秘也不新鲜，莫尔斯发明电报、贝尔发明电话之前，通信系统（八百里加急）乃至无线通信系统（烽火狼烟）照样存在。现代通信系统如此迅速地发展应当归功于电磁波的传播速度，光速传播的魅力让其他通信系统相形见绌，也最大限度地满足了人们对于沟通实时性的要求。

下面就回到本节的正题——电磁信号。电磁信号是一个时间的函数，这很好理解，不同的时间里它都有不同的值。同时，电磁信号还可以表示为频率的函数。也就是说，一个信号是由不同的频率成分组成的，这个观点并不好理解，因为我们的日常生活中通常都是以时间的观点来解读信号的。古有沙漏、日晷，今有手机、手表，无论是二十四节气表还是列车时刻表，都说明了人们已经习惯用时间来衡量与标记这个世界。如果谁想用频率来作为刻度，那简直就和用二进制来做加法一样显得有点奇怪。

然而，从频域的观点来理解信号对于一个从事通信技术工作的人来说又是如此重要，

以至于缺乏这种意识就寸步难行。从奈奎斯特采样定理到香农理论，从 GSM 到 WCDMA，通信的每一寸土地每一个角落都渗透着频率的思想，它如氧气一般，无处不在，且不可或缺！

其实我们的日常生活中对于频率也不是完全没有直观的认识。相信大家都看过男女声合唱，一个高八度一个低八度，在这里，这个所谓的高八度与低八度指的就是声带的振动频率。

1.3.2　信号的时域概念

现在我们就以时域的观点和频域的观点来对信号做一番介绍，这或许要用到一点数学知识，还好这并不困难。

从时间函数的观念来看，一个信号或者是模拟的或者是数字的。如果一段时间内，信号的强度变化是平滑的，没有中断或者不连续，那么这种信号就称为模拟信号（analog signal）。如果一个信号在某一段时间内信号强度保持某个常量值，然后在下一时段又变化为另一个常量值，这种信号就称为数字信号（digital signal）。模拟信号和数字信号的区别可以很容易地从图形上看出来，图 1.13 所示为这两种信号的例子。这里的模拟信号可能代表了一段噪声，而数字信号则代表了二进制的 0 和 1。

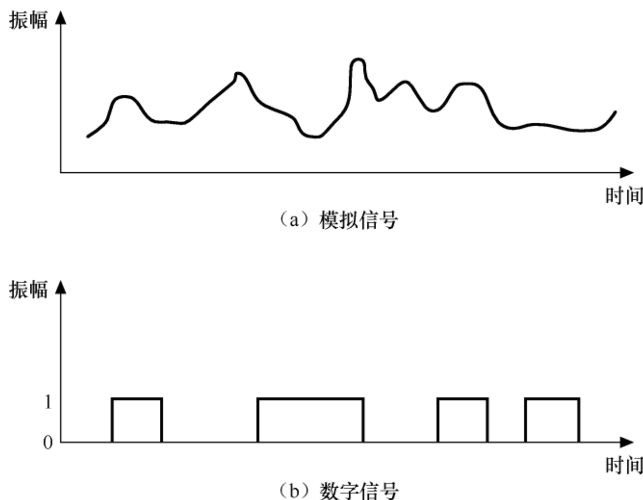


图 1.13　模拟信号和数字信号波形

最为简单的信号当然是周期信号。何谓周期信号？周而复始不断重复的信号就叫周期信号。比如我们说“做一天和尚撞一天钟”，和尚撞钟念佛，天天如此，你也不妨把它理解为周期信号。周期信号为啥简单啊，每天一样能不简单么。凡分析事情，一般习惯从简单的入手，我们对信号进行分析，也往往从周期信号开始。



也可以从数学上来理解周期信号，当且仅当信号 $s(t+T)=s(t)$时，信号 $s(t)$才是周期信号，这里的常量 T 是信号周期。如果不满足这个等式，那么信号就是非周期的。

图 1.14 示出了两个典型的周期信号，一个为正弦波，另一个为方波。

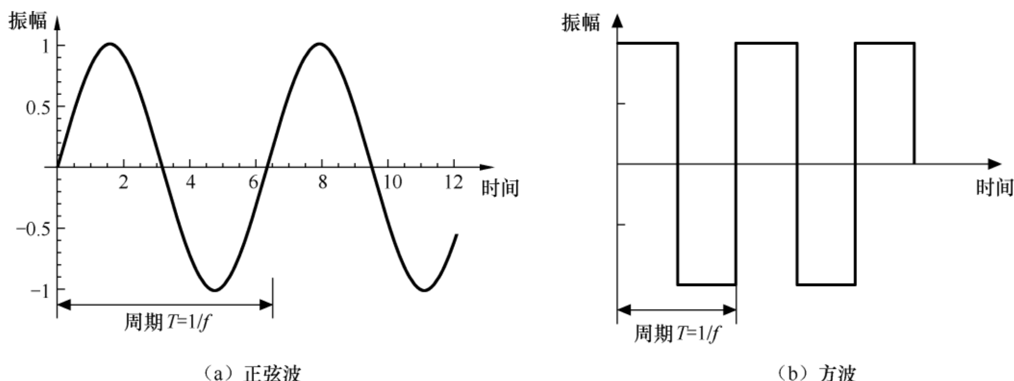


图 1.14　周期信号示例

正弦波是最基本的模拟周期信号，简单正弦波可以用以下 3 个参数表示，即幅度（A）、频率（f）和相位(θ)。振幅（amplitude）是指一段时间内信号的最大值。频率（frequency）是指信号循环的速度（通常用 Hz 表示）。频率的倒数是周期（period）T，$T=1/f$，它是指信号重复一周所花的时间。相位（phase）是指一个周期内信号在不同时间点上的相对位置。

一般的正弦波可如下表示：

$$S(t)=A\sin(2\pi ft+\theta)$$

我们可以看一下振幅、频率和相位分别取不同值时的情况，如图 1.15 和图 1.16 所示。

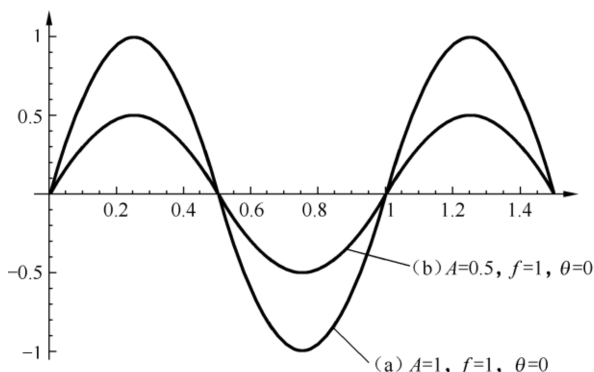


图 1.15　正弦波 $S(t)=A\sin(2\pi ft+\theta)$幅度变化



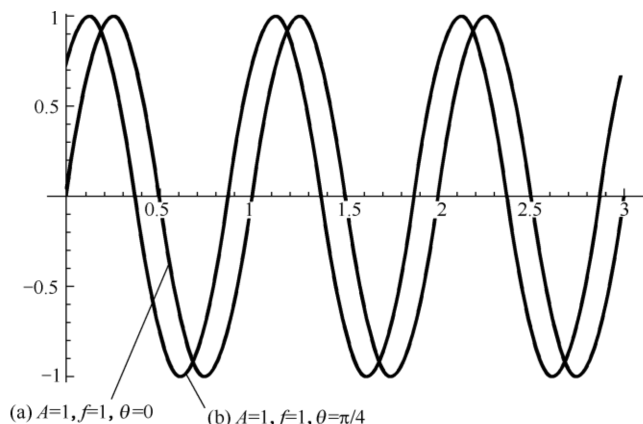


图 1.16　正弦波 $S(t)$=Asin($2\pi ft+\theta$)相位变化

1.3.3　信号的频域概念

频域的概念对于通信而言非常重要，属于非掌握不可的内容。

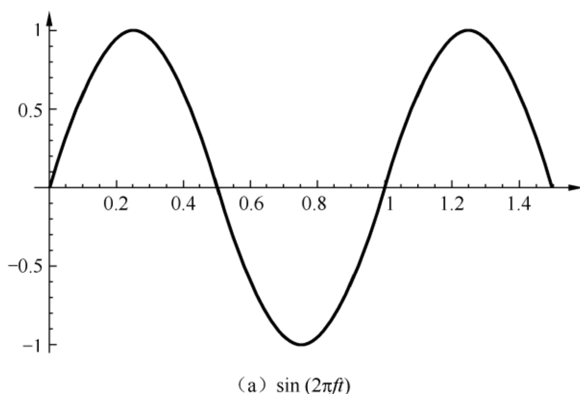
我们在 1.3.2 小节中对正弦波做了一番简单的介绍，然而通常一个电磁信号会由多种频率组成，而非单一的频率，比如说下面的信号：

$$S(t) = \sin(2\pi ft)+(1/2)\sin[2\pi(3f)t]$$

这个信号的组成成分只有频率为 f 和频率为 $3f$ 的正弦波，如图 1.17 所示。

这种频率成分的叠加会形成一个有意思的现象，如果我们给予每个谐波分量一个合适的系数，然后把这些谐波分量叠加起来，那么叠加的图形会越来越接近一个方波。

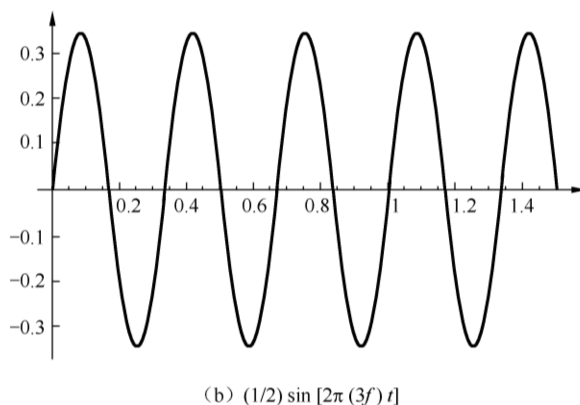
这个结论或许不是那么重要，但我们将它引申一下，提出一个思考题。作为周期信号的方波可以近似地用正弦信号及其谐波信号来表示，那么其他周期信号是否也具有同样的性质呢？



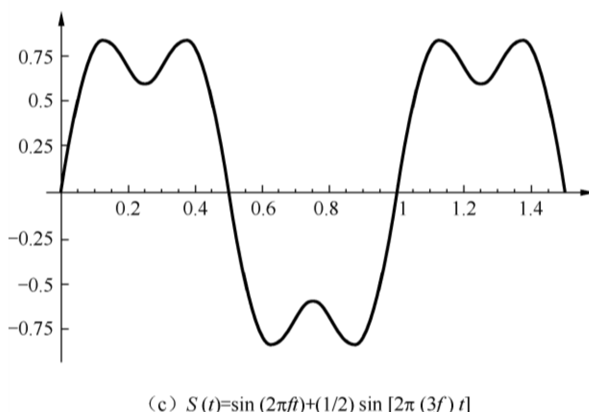
（a）$\sin(2\pi ft)$

图 1.17　频率成分的叠加（T=1/f）





（b）(1/2) sin [2π (3*f*) *t*]



（c）*S* (*t*)=sin (2π*ft*)+(1/2) sin [2π (3*f*) *t*]

图 1.17　频率成分的叠加（*T*=1/*f*）（续）

1.4 "贝尔话筒"的工作之二— 分析信号

我们在上节对简单的正弦波做了介绍，但是这对实际工作的作用是非常有限的。因为无论是电磁信号还是声波信号，都不会是一个简单的正弦函数。上节所介绍的正弦函数的波形及一些性质，面对如图 1.18 所示的信号就会显得束手无策。

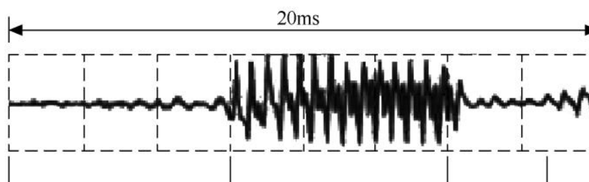


图 1.18　20ms 的话音信号

图 1.18 所示的是 20ms 的话音信号。在一般的话音通信系统中，通常以 20ms 为单位对信号进行抽取然后编码。分析这样的信号对目前的我们来说是困难的，因为我们还没有掌握分析信号的工具，就像手里没有斧子就砍不了大树一样。

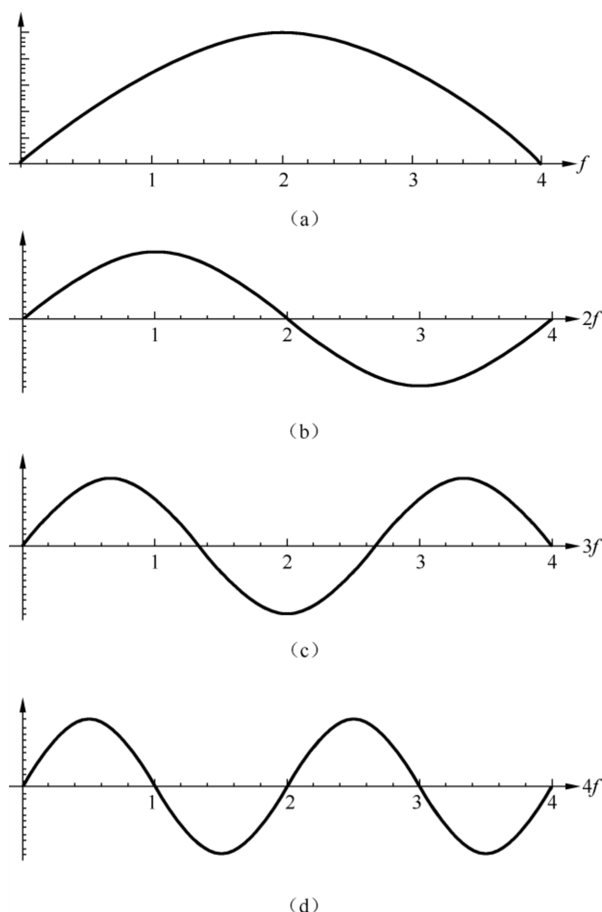


图 1.19　抖绳子的示例图

这个毫无规律的信号看得我们头都大了，很不爽，总得先找个有点规律的开始研究，嗯，咱还是拿周期信号开刀，这样比较简单。

对周期信号的分析研究，最早来自 1748 年欧拉对振动弦进行的研究工作。我们把绳子一头系在墙上，另一头拿在手里，然后用力抖绳子。那么在绳子上就会形成一个又一个的波，抖得越快的话，那么波浪就会越多，这样的生活体验相信大家都有过，如图 1.19 所示。



1.4.1　始于欧拉，成于傅里叶

欧拉就这么一个看似简单的振动弦的运动的分析，日后竟然演化成了傅里叶变化和傅里叶分析，成了现代通信理论最重要的基石理论——信号与系统。

欧拉对振动弦的问题继续分析下去，发现所有的振荡模式都是 x 的正弦函数，并成谐波关系。欧拉得出的结论是：如果某一时刻振动弦的形状是其谐波的组合，那么在其后任何时刻，振动弦的形状也都是这些振荡谐波的组合。

欧拉的结论很深奥，咱们用一句通俗的话说，那就是在绳子上滚动的信号，总可以表示为图 1.20 所示的一堆正弦波的叠加，至于每个正弦波所占的比重也就是系数咱另说。正弦函数和余弦函数统称三角函数，在信号与系统中，往往习惯叫三角函数。

1753 年，伯努利声称一根弦的实际运动都可以用振荡谐波的线性组合来表示。

1759 年，拉格朗日提出了反对意见，他批评了使用三角级数来研究振动弦的主张，认为这个没多大用处。因为实际的信号往往是有中断点的，不像绳子一样从头到尾都是完整的。那么有间断点的信号就像一根断了的绳子，你还能用三角级数来分析吗？

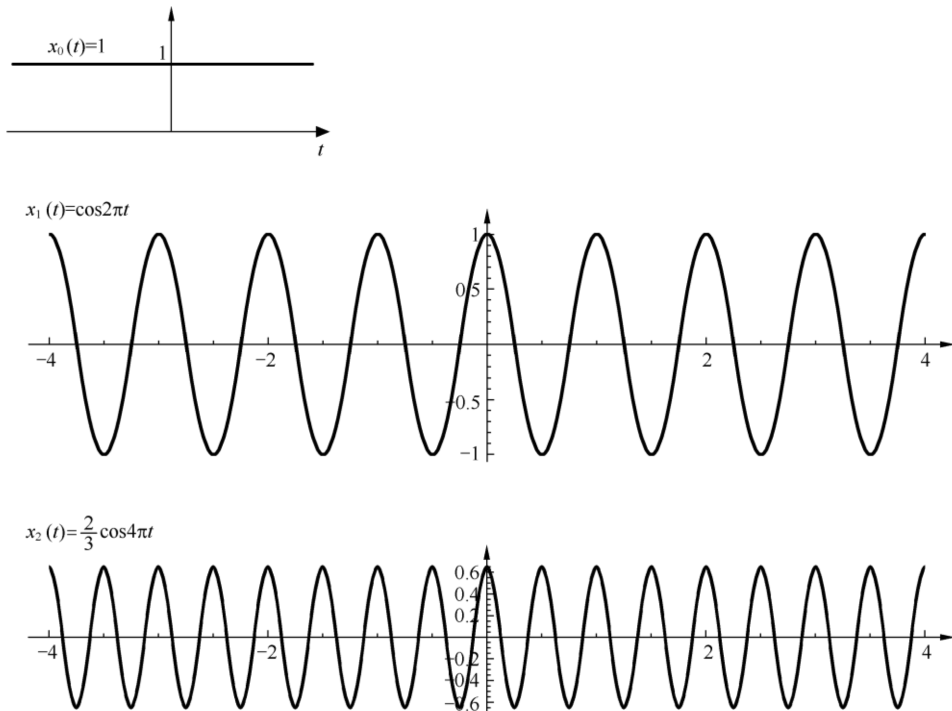


图 1.20　例 1.1 中 $x(t)$作为谐波关系的正弦信号的线性组合来构成的图解说明



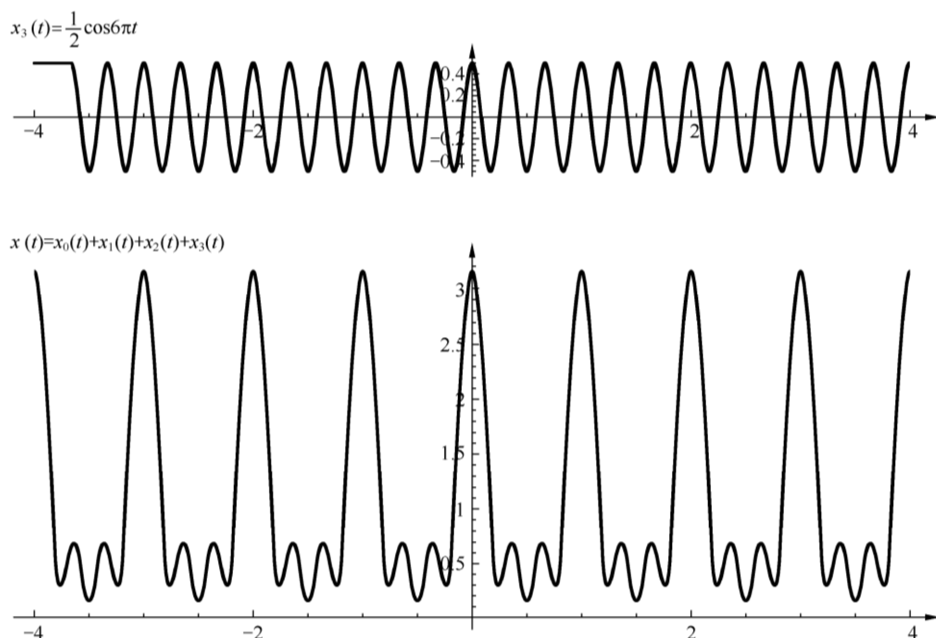


图 1.20　例 1.1 中 $x(t)$作为谐波关系的正弦信号的线性组合来构成的图解说明（续）

这时候轮到我们的主人公傅里叶登场了。1807 年，傅里叶在进行热力学研究的时候发现，表示一个物体温度分布的时候，成谐波关系的正弦函数级数是非常有用的。这时候他提出了一个大胆的猜想：“任何”周期信号都可以用成谐波关系的正弦函数级数来表示？！

这个论述非常有意义，因为它适用范围非常广。傅里叶本人并没有给出详细的数学论证，这个命题后来是由狄里赫利给出完整的证明：在一定的条件下，周期信号可以用成谐波关系的正弦函数级数来表示。

另外，傅里叶还给出了非周期信号的表达方式：不是成谐波关系的正弦信号的加权和，而是不全成谐波关系的正弦信号的加权积分。

1.4.2　周而复始的信号有啥特点—　傅里叶级数

刚才我们说了在满足狄里赫利条件下，周期信号可以用成谐波关系的正弦函数来表示。我们知道，如果一个信号是周期的，那么对于一切 t，存在某个正值的 T，即

$$x(t)=x(t+T) \tag{1.1}$$

现在我们来考虑周期复指数信号（因为它在信号与系统中应用最广泛），即

$$x(t)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_0 t}=\cos\omega_0 t+\mathrm{j}\sin\omega_0 t \tag{1.2}$$



我们很容易看出复指数信号是周期的，而且其基波频率为 ω_0，基波周期为 $T=2\pi/\omega_0$。那么与它成谐波关系的信号的频率就应该是它的 k 倍。可以得出式（1.2）中的复指数信号的一个成谐波关系的信号的集合，如下表示：

$$\phi_k(t)=\mathrm{e}^{\mathrm{j}k\omega_0 t}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(2\pi/T)t} \qquad k=0,\ \pm 1,\ \pm 2,\cdots \tag{1.3}$$

这些信号都有一个基波频率，它是 ω_0 的倍数。因此每一个信号对周期 T 来说都是周期的。于是，由傅里叶的推论和狄里赫利的证明，可以得出一个由成谐波关系的复指数线性组合形成的信号，如下表示：

$$x(t)=\sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k \mathrm{e}^{\mathrm{j}k\omega_0 t}=\sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k \mathrm{e}^{\mathrm{j}k(2\pi/T)t} \tag{1.4}$$

在上式中，a_k 就是欧拉所说的加权系数，$\mathrm{e}^{\mathrm{j}k\omega_0 t}$ 就是欧拉所说的谐波信号。$k=0$ 这一项就是一个常数，$k=+1$ 和 $k=-1$ 这两项都有基波频率等于 ω_0，两者合在一起称为基波分量或一次谐波分量。$k=+2$ 和 $k=-2$ 这两项也是周期的，其周期是基波分量周期的 1/2，频率是基波频率的 2 倍，称为二次谐波分量。一般来说，$k=+N$ 和 $k=-N$ 的分量称为第 N 次谐波分量。一个周期信号表示成式（1.4）的形式，称为傅里叶级数。

我们在这里举一个例子来说明傅里叶级数到底有什么用途（如图 1.20 所示）。

例 1.1　假设有一个周期信号 $x(t)$，其基波频率为 2π，只要其满足狄里赫利条件，我们就可以把这个周期信号写成式（1.4）的形式，则为：

$$x(t)=\sum_{k=-3}^{+3} a_k \mathrm{e}^{\mathrm{j}k2\pi t} \tag{1.5}$$

其中 $a_0=1, a_1=a_{-1}=1/2, a_2=a_{-2}=1/3, a_3=a_{-3}=1/4$。

我们将式（1.5）中具有同一基波频率的谐波分量合在一起以便于计算，得到下式：

$$x(t)=1+\frac{1}{2}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi t}+\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi t})+\frac{1}{3}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}4\pi t}+\mathrm{e}^{-\mathrm{j}4\pi t})+\frac{1}{4}(\mathrm{e}^{\mathrm{j}6\pi t}+\mathrm{e}^{-\mathrm{j}6\pi t})$$

对上式进行简化，可得：

$$x(t)=1+\cos 2\pi t+\frac{2}{3}\cos 4\pi t+\frac{1}{2}\cos 6\pi t$$

$$x_0(t)=1$$

我们在本例中演示了一个周期信号是如何分解为基波信号和谐波信号之和的。试想一下，符合狄里赫利条件的周期信号都可以这样分解为一个个正弦信号的和，正弦信号又是我们非常熟悉的，那应付起来岂不是如庖丁解牛。话说正弦信号之和虽然有这么多项不是那么好处理，总比两眼一抹黑地去对付一个啥性质也不知道的周期信号要好吧。

所以说傅里叶级数其伟大的地方就在于，把一个看上去没什么规律的周期信号给规律化了（从数学上理解为基波信号和谐波信号的叠加），这样一来我们总算有了对付周期

信号的数学工具。

且慢！！想必聪明的朋友已经发现了，我们在例 1.1 里回避了一个问题，那就是这些谐波在整个信号中所占的分量，也就是加权系数 a_k 到底是怎么得来的呢？

虽说我们现在已经知道了任意一个符合狄里赫利条件的周期信号都可以表述为 $x(t)=\sum_{k=-3}^{+3}a_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}k2\pi t}$ 的形式，但是如果不告诉我 a_k 怎么得来的那还是白说，我还是没有办法将一个周期信号分解为不同的谐波分量啊。你不能光给世界观，不给方法论啊。

求这个系数的方法是有的，但是其数学证明却相当复杂，所以在这里我们略去证明过程，仅仅给出结论。希望对完整的证明过程有所了解的读者请参见参考文献 1 的第 3 章的有关内容。假设 $x(t)$为符合狄里赫利条件的周期信号，那么要将其分解为式（1.5）的形式，其系数的求法如下所示：

$$x(t)=\sum_{k=-\infty}^{+\infty}a_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}k\omega_0 t}=\sum_{k=-\infty}^{+\infty}a_k\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(2\pi/T)t} \tag{1.6}$$

$$a_k=\frac{1}{T}\int_T x(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k\omega_0 t}\mathrm{d}t=\frac{1}{T}\int_T x(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k(2\pi/T)t}\mathrm{d}t \tag{1.7}$$

式（1.6）称为综合公式，式（1.7）称为分析公式。系数 a_k 往往称为 $x(t)$的傅里叶级数系数或 $x(t)$的频谱系数。这些复数系数是对信号 $x(t)$中的每一个谐波分量的大小作出的量度。系数 a_0 就是 $x(t)$的直流或常数分量。

提示： 我们在上面研究了周期信号的傅里叶表达方式，但是这对研究信号是不够的，因为很多信号是非周期的，比如本节开始图 1.18 所示的信号就不是周期的。本书中要研究的大多数信号，比如话音信号，也是非周期的。我们面对非周期信号是不是也有什么有效的方法来进行数学处理呢？或许有人要摩拳擦掌试图干出点什么，但是很不幸，这个问题也被傅里叶解决了，就是我们接下来要讨论的傅里叶分析。

1.4.3 用统计数据说话— 傅里叶分析

傅里叶是这样看待非周期信号的，他认为一个非周期信号可以看作周期无限长的周期信号，正是这种颇具有哲学意味的观点填平了周期信号与非周期信号之间的鸿沟，从而拉开了傅里叶分析的序幕。

下面我们就试着用傅里叶级数的观点来对非周期信号进行探讨：首先回到式（1.6），当周期 T 增加时，基波频率 $2\pi/T$ 就减小，所以成谐波关系的各分量在频率上就越靠近。当周期变成无穷大时，这些频率分量之间就变得无限小，从而组成一个连续域，傅里叶级数的求和就变成了进行积分。



出于篇幅和内容的考虑，我们仅对傅里叶分析给出感性的认识，具体的数学证明过程，请参见本书参考文献 1 的第 3 章。

傅里叶分析的数学表达式为：

$$x(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}X(\mathrm{j}\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}\omega \tag{1.8}$$

$$X(\mathrm{j}\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}x(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}t \tag{1.9}$$

式（1.8）与式（1.9）称为傅里叶变换对，函数 $X(\mathrm{j}\omega)$ 称为 $x(t)$ 的傅里叶变换或傅里叶积分，式（1.8）称为傅里叶反变换。请分别比对式（1.6）与式（1.8）、式（1.7）与式（1.9）的异同。

无论是傅里叶级数也好，傅里叶变换也罢，价值之一在于给我们提供了一个分析信号的工具，结合系统的一些特性，可以得出很多有用的结论。价值之二在于给了我们一个看待信号的全新的视角，我们以前都是从时域的角度来看待信号，把信号理解为时间上电平高高低低的连续变化，它是一个二维的坐标体系，两个维度分别是时间和电平值；现在我们可以从频域的角度上来理解信号，把信号理解为不同频谱的复指数信号的叠加，也就是基波分量和谐波分量的叠加，不同频率的谐波分量有着不同的权重系数，这也是一个二维的坐标体系，两个维度分别是频率和权重系数。

很多人对于时域到频域的转换难以理解，其实就是无法理解这两个坐标系的转变，我们不妨举一个简单的例子做一下说明，体会一下“时域—频域”坐标系是怎么变化的。乔丹是篮球之神，他打篮球动作频率很快，这一秒可以做 4 个动作，下一秒可以做 3 个动作，下下秒可以做 5 个动作，下下下秒……我们首先看看这一句话如何用时域坐标系表示，如图 1.21 所示。

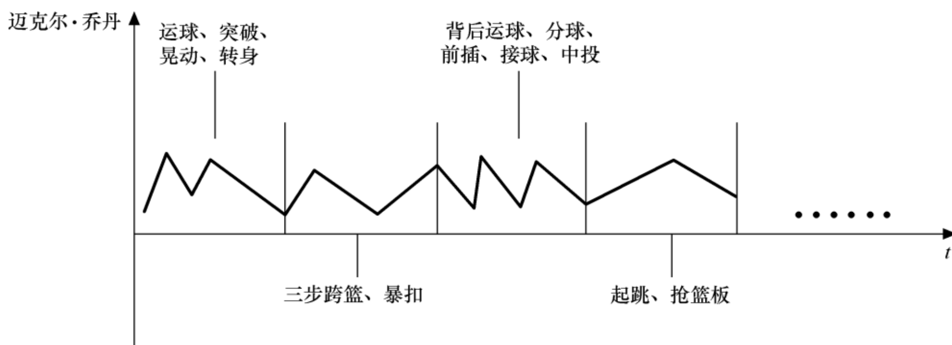


图 1.21　从时域的观点来欣赏迈克尔·乔丹

作为一个普通的观众，我们通常是从时域的观点来欣赏迈克尔·乔丹，看看他这秒干了什么，下一秒又做了哪些精彩的动作。

可是偏偏还有这么一群人，他们目光深邃，表情冷峻，他们对篮球场上那些华丽的

诗章毫无兴趣，他们根本就不用时域的观点来欣赏迈克尔，他们用频域！！！这些人是干嘛的呢，他们是球队的技术分析，他们统计迈克尔每秒都做了多少动作，用频域的观点来分析迈克尔能给球队带来多少胜利。这群人毫无疑问是欧拉和傅里叶的崇拜者，估计对伯努利和拉普拉斯也是仰慕有加，要不你没法解释他们为什么要这么做，我们来看看这群人是怎么来分析迈克尔·乔丹的（如图 1.22 所示）。

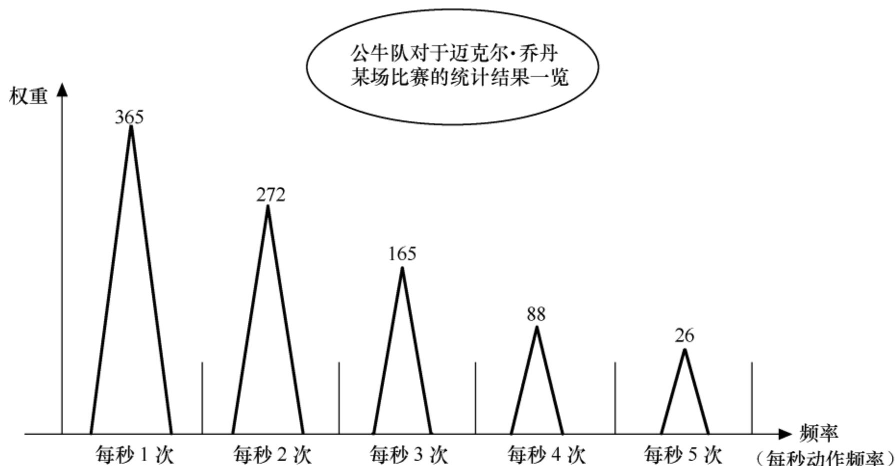


图 1.22　从频域的观点来欣赏迈克尔·乔丹

傅里叶级数实现从时域到频域的变换也类似于此，迈克尔一场比赛打的时间的长短只是影响各个动作频率在图 1.22 中的权重而已。信号在时域上的不断延伸只不过是改变各个谐波分量的权重值而已，频域上不需要时间这个维度，时间上的变化在这里转换成了权重上的变化。

总体而言，我们通过傅里叶变换和傅里叶分析探询出了杂乱无章的信号中的规律，一个信号，无论它是周期的还是非周期的，我们都能用数学公式对它进行表达。一个东西能用数学式表达，那么也往往就意味着我们能对它进行分析和重现，所以才说傅里叶的理论构成了现代通信的基石。

对于信号是什么和信号怎么样进行分析介绍就到这里，刚才几节中我们更多地关注的都是模拟信号的事情，接下来我们要来关注怎么把模拟信号数字化。

1.5 “贝尔话筒”的工作之三——如何把模拟信号变为数字信号

我们知道，贝尔他老人家发明电话的时候，那个话筒走的是模拟信号，也就是连续



不断高高低低的电流信号。而通信发展到今天，在多数领域都已经数字化了，比如大家用的手机，无论是 GSM 还是 WCDMA 的，都是数字制式的。那么“贝尔话筒”也必须与时俱进，得想办法把原来的电流模拟信号转变成数字信号。

从模拟到数字的转换包含了“抽样”、“量化”两大过程，这两大过程是为了让模拟信号流转变成比特信号流。通常情况下，为了更有效率地表达我们想表达的内容，我们还需要对其进行“信源编码”，同时，电磁波在空中的传送是经常受到干扰的，比特信息在传送过程中出现错乱遗漏那是难免的事情，所以我们还要进行“信道编码”，增加信息的冗余度，同时想办法将连续的信息分散到不同的位置，以确保丢失的信息能够复原。

1.5.1　声音是如何变成比特流的——奈奎斯特采样定理

1.4 节中图 1.18 所示为一个 20ms 的话音信号，这样一个信号是如何转变为“0”、“1”交错的比特流的呢，这就是本小节要讨论的内容。

大家回忆一下我们在初中时画正弦曲线 $y = \sin x$ 的时候是怎么做的，老师会要求我们尽量多地描出一些点，比如（0，0）、（π/6，1/2）、（π/4，$\sqrt{2}/2$）等，在坐标轴上描图，然后用光滑的曲线把这些点连接起来，就成了连续的正弦函数曲线图。

我们使用的“模拟—数字”变换技术与上述过程有异曲同工之处，从时间轴上等间隔地取 N 个时间点，然后取 N 个值，这个过程称为“采样”。

问题就来了，究竟要取多少个点，原有的连续时间信号所含的信息才不会丢失，才能完整地保留下来，然后被还原？

凭我们的第一直觉，往往认为肯定需要无穷个点才能保证信号能不被丢失地还原，也就是采样频率为无穷大。然而，奈奎斯特却给出了一个论证，他证明了如果一个信号是带限的（即它的傅里叶变换在某一有限频带范围以外均为零），如果采样的样本足够密的话（采样频率大于信号带宽的两倍），那么就可以无失真地还原信号。这个结论被称为奈奎斯特采样定理。

对于奈奎斯特采样定理，有着严格的数学证明，请参见参考文献 1 的第 7 章。在这里仅举一个实际的例子，让大家对此有一个直观的认识。

看电影的时候，电影播放的画面是连续的吗？和眼睛直接看该场景会是一样的吗？非也，电影里的世界和我们眼睛里直接看到的世界是有差别的，匪夷所思吧。

电影播放的实际不是连续画面，而是由一张张的胶片或者说一帧帧的画面组成的，其中每一帧都代表着连续变化景象中的一个瞬时画面（也就是时间样本）。当以足够快的速度来看这样连续的样本时，我们就会感觉到是原来连续活动景象的重现。一般情况下每秒要采集多少样本，眼睛才会觉得这是连续的画面呢？电影的通常做法是每秒播放 24 帧，也就是说采样频率是 24 就够了，眼睛会对画面有一个非常短暂的“视觉停留”，这

相当于对样本信号的一个内插来还原原信号的过程。所谓“内插”，用中学数学的话来说就是把你刚才描的点用线连起来，形成了一个函数的图形。下面用图 1.23 来表述眼睛对电影画面的“内插”的原理。

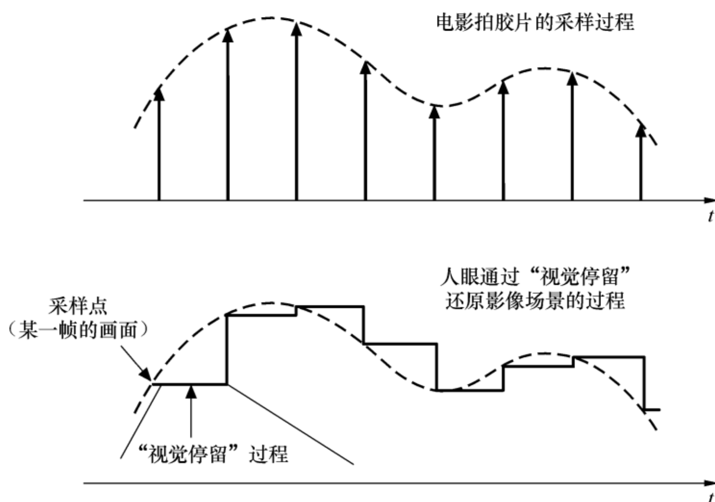


图 1.23　电影的 24 帧与人眼的“视觉停留”

图 1.23 中的“内插”或者说“视觉停留”用“信号与系统”的话说就是“零阶保持”了。

话说这 24 帧的采样频率真的是够吗，对于绝大多数情况下是够了，不过有一种情况下可能就不够了。比如说马车的轮子，要是这个轮子运动得飞快，一秒不止转 12 圈的话，也就是说 24 帧采样频率不够的话，那么问题就来了，在电影中甚至会看到轮子朝运动的相反方向转动的情况，相信很多人有过这样的体验。我们称这种情况为“欠采样”，那么这个情况是怎样发生的呢？请看图 1.24。

摄像机每秒拍摄 24 帧画面，也就是 24 张胶片。我们假设马车轮每秒转动 18 圈，那么采样频率就达不到 2 倍频，就会出现“欠采样”的情况，不能完整地反映马车的运动情况。

两次采样的间隔是 1/24s，马车轮是顺时针转动的，在此段时间内可以转动（1/24）×18=3/4 圈，也就是说顺时针转动 270°，然而从人眼中看就好像是逆时针转动了 90°一样，从而造成了轮子反着转的错觉。术语也称之为“混叠”。

那么奈奎斯特采样定理对我们将话音的模拟信号转换为比特流有什么实际的意义呢？

人发出的声音的频率一般为 85～1 100Hz，而 1～4kHz 也是人耳非常敏感的频率范围。奈奎斯特采样频率选定为 8kHz 就基本可满足手机通话的需求，实际上，GSM 规范



规定的 GSM 手机采样频率正是 8kHz。

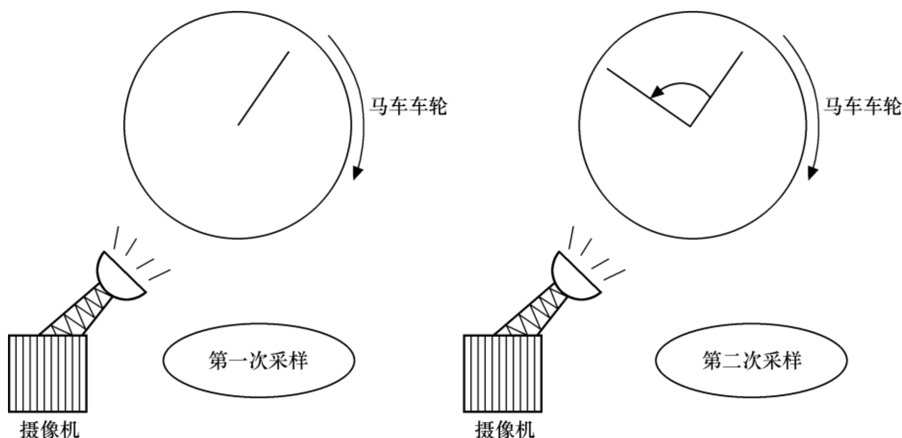


图 1.24　电影拍摄时候马车车轮的转动情况

1.5.2　从原始分到标准分——量化

奈奎斯特采样定理的意义在于它提供了从连续时间信号向离散时间信号转换的通道，使得利用离散时间系统技术来实现连续时间信号成为可能。但奈奎斯特采样得出来的结果，只能称为“离散时间信号”而不是真正意义上的“数字信号”。

道理很简单，像图 1.23 的采样，其采样值还是随信号幅度连续变化的，即采样值 $m(kT)$ 可以取无穷多个可能值。假设要用一个 N 位二进制位组来表示该数值的大小，以便对该信号进行数字化处理，但是 N 位二进制比特只能表征 $M=2^N$ 个电平值，而不能与无穷多个电平值相对应。这样一来，采样值必须被划分为 M 个离散电平，此电平被称为量化电平。

可以这样说，采样的作用是把一个时间连续信号变成时间离散的信号，而量化则是将取值连续的采样变成取值离散的采样。

量化也分为两种，一种是均匀量化，另一种是非均匀量化。

1. 均匀量化

把输入信号的取值等距离分割的量化称为均匀量化，如图 1.25 所示。这种量化方式有点像当年的标准分制，我国以前采取过 5 分制，把 81～100 的原始分规定为 5 分，61～80 规定为 4 分，41～60 规定为 3 分，21～40 规定为 2 分，1～20 规定为 0 分，颇有点优秀、良好、及格、不及格这种粗略评价的感觉。



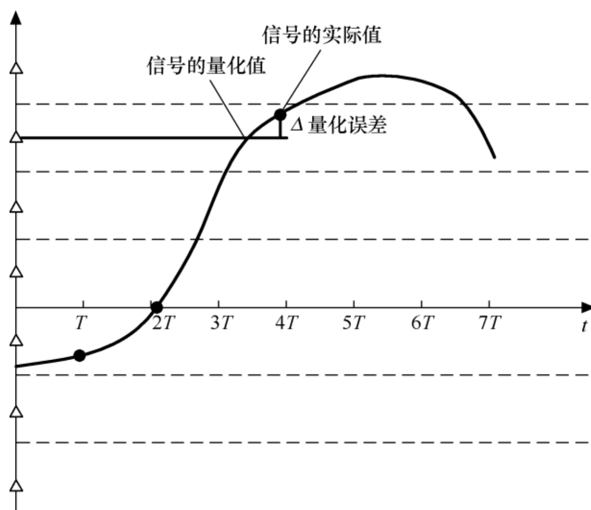


图 1.25　均匀量化示意图

我们在图 1.25 中将纵坐标划成均匀的一个个的区间，每个区间的间隔称为量化间隔 $\Delta\nu$，每个区间的中值取为量化电平。量化间隔取决于输入信号的变化范围和量化电平数。以上两个参数确定后，量化间隔也被确定。例如，假如输入信号的最小值和最大值分别用 a 和 b 表示，量化电平数为 M，则：

$$\Delta\nu = \frac{b-a}{M}$$

量化的好处是方便进行数字处理，代价是产生了失真，也就是图 1.25 所示的量化误差。这种失真也通常称为量化噪声。量化噪声由量化前的连续随机变量与量化后的离散随机变量的均方差来进行度量。

2. 非均匀量化

均匀量化有一个比较要命的问题，那就是对于小信号而言误差比较大，信噪比的结果比较差劲，这个事情怎么说呢，下面举一个例子进行说明。

假设一个信号的变化范围为[0，10]，量化电平数为 10，那么取每个区间的中值为量化电平，就分别为 0.5，1.5，2.5，…，9.5。

那么对于小信号 0.9，在第 1 个区间里，所以其量化电平为 0.5，那么其信号功率为 $S_0=(0.9)^2=0.81$，量化噪声功率为 $N_0=(0.9-0.5)^2=0.16$，因此信号与量化噪声功率比为：

$$\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\text{dB}} = 10\lg\left(\frac{0.81}{0.16}\right) \approx 7\text{dB}$$

那么对于大信号 9.9，在第 10 个区间里，所以其量化电平为 9.5，那么其信号功率为



S_0=$(9.9)^2$=98.01，量化噪声功率为 $N_0 = (9.9-9.5)^2 = 0.16$，因此信号与量化噪声功率比为：

$$\left(\frac{S_0}{N_0}\right)_{\text{dB}} = 10\lg\left(\frac{98.01}{0.16}\right) \approx 27\text{dB}$$

由此可以看出，均匀量化对于小信号而言，其信噪比太低，远远低于大信号的信噪比，而对于话音信号而言，一般又是小信号居多。这种现实的矛盾使得均匀量化越来越不适合于通信应用，于是就导致了非均匀量化的诞生。

实际中非均匀量化的实现方法通常就是将采样值经过压缩后再进行均匀量化。所谓压缩就是用一个非线性变换电路将输入变量 x 变换成另一个变量 y，即 $y = f(x)$。非均匀量化就是对压缩后的变量 y 进行均匀量化的过程。

通常使用的压缩器中，大多采用对数式压缩，即 $y = \ln x$，目前美国采用的是μ律压缩，我国和欧洲采用的是 A 律压缩，下面就来介绍一下 A 律压缩。

所谓 A 律压缩就是压缩器具有如下特性的压缩律：

$$y = \frac{Ax}{1+\ln A}\text{，}0 < x \leqslant \frac{1}{A}$$

式中，x 为归为一化的压缩器输入电压；y 为归一化的压缩器输出电压；A 为压扩参数，表示压缩程度，在实际中，往往选择 A=87.6。

由于在电路上实现这样的函数规律极其复杂，所以在实际应用中通常采用近似于 A 律函数规律的 13 折线（A=87.6）的压扩特性。13 折线的示意图如图 1.26 所示。

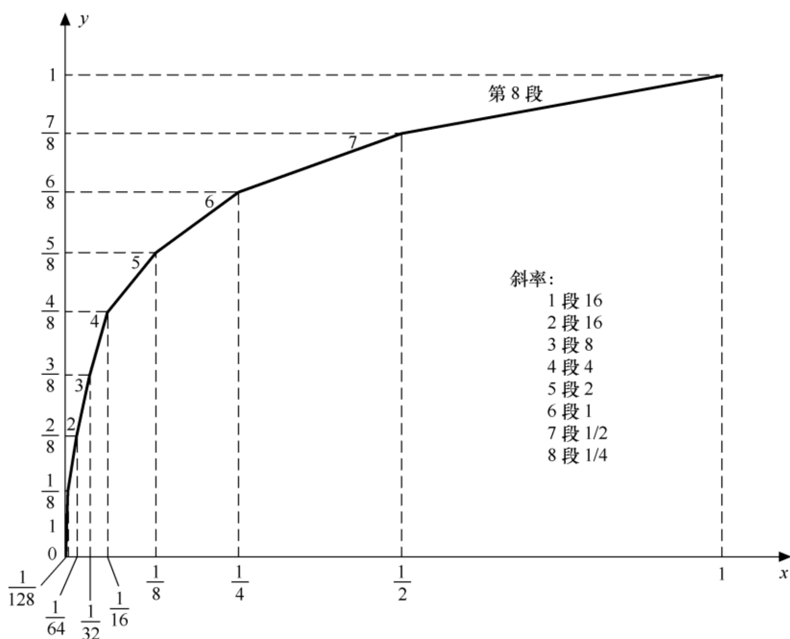


图 1.26　13 折线示意图

由图 1.26 可以看出，y 轴实际上是 x 轴的函数，是 x 轴的非均匀映射，通过这种方式，就可以通过 y 轴的均匀量化实现 x 轴的均匀量化。

上面所述的是发射端的压缩，至于接收端对信号的扩张，实际上就是压缩的反过程。

1.5.3 从《蒹葭》和《在水一方》说起— 也谈编码

经过了奈奎斯特采样和非均匀量化后，就得到了我们想要的比特流了吗？No！经过量化后我们只不过得到了一堆量化电平值，怎么对这些量化电平进行编码让其变成比特流，那还是一件颇伤脑筋的事情。

无论采取哪一种编码，它描述的都是一个连续时间的话音信号在离散域上的映射，反正描述的东西都是一个，我们自然希望编码越简单越好，效率越高越好。

说到编码，在本小节中的意思就是将量化电平转化为二进制比特流的过程。其实作者认为完全不必理解得这么狭义，可以从更广的视角来理解编码。比如说语言就是对人类的事物和情感进行的编码，对于同一件事情，在人类世界可能有多种编码（语言）与之对应。比如说我爱你，英语的编码就是“I love you”，法语的编码是“je t’aime，je t’adore”，德语的编码是“Ich liebe dich”，意大利语的编码是“Tiamo”。与此类似的，对于同一个量化电平，也可能有多种编码方式，比如说 PCM、ΔM、DPCM，它们用各自不同的方式来阐述同一个量化电平。

编码有一个很重要的问题就是效率问题，通信系统的资源是宝贵的，自然希望对一个量化电平的阐述能够尽量节约一点，占用少一点的电平。下面用一个稍微夸张一点的例子说明什么是编码的效率。

当你在河边漫步的时候，无意间发现一位佳人，一袭白裙飘飘，清新脱俗，温婉可人，令你心生爱慕，相思难断，你打算如何用文字（编码）来表达你的这份思绪呢？

琼瑶和《诗经》分别用《在水一方》和《蒹葭》给出了不同的答案。



《在水一方》
绿草苍苍/白雾茫茫/有位佳人/在水一方
我愿逆流而上/依偎在她身旁/无奈前有险滩/道路又远又长
我愿顺流而下/找寻她的方向/却见依稀仿佛/她在水的中央
《蒹葭》
蒹葭苍苍/白露为霜/所谓伊人/在水一方
溯洄从之/道阻且长/溯游从之/宛在水中央

单从编码效率而言，《在水一方》和《蒹葭》高下立判，至于诗词的优美程度，那就不是本节需要评判的内容了。



下面我们来讨论一下 PCM 编码和 DPCM 编码，看看后者相比前者作了哪些改进从而提高了编码效率。

1. PCM 码

值得注意的是，真正的通信系统中应用的 PCM 编码是采用 A 律 13 折线法的，用 8 个 bit 位来表征，共可以表示 2^8=256 个电平。为了简便起见，我们用 4 个 bit 位的 PCM 编码来说明问题。4 个比特可以表征 16 个量化电平，最高位比特设置为极性码，当电平值为正时取“1”，为负时取“0”，如图 1.27 所示。

图 1.27 中共有 16 个量化区间，其量化间隔为 0.5V，各个量化区间的判决电平依次为−4V，−3.5V，…，3.5V，4V。16 个量化电平分别为−3.75V，−3.25V，…，3.25V 和 3.75V。图 1.27 显示了 12 个采样值电平，下面对它们进行编码（如表 1.1 所示）。

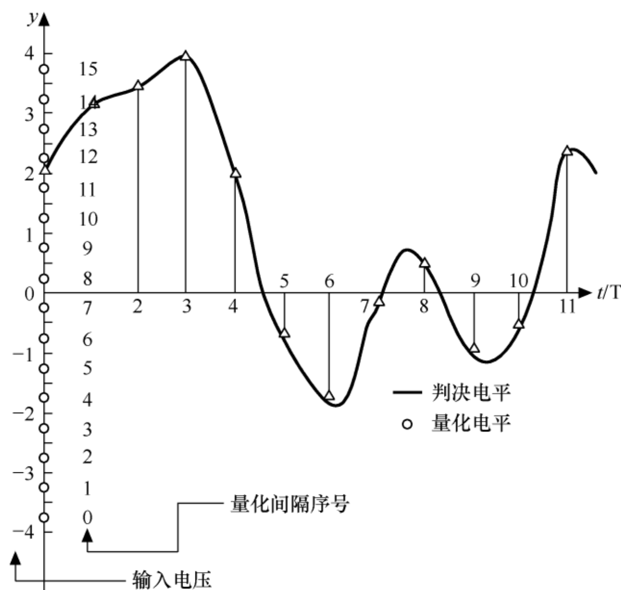


图 1.27　PCM 量化与编码

表 1.1　PCM 量化与编码

采样时间	6T	5T	7T	8T	4T	0T	1T	2T	3T
采样值	−1.76	−0.75	−0.2	0.4	1.9	2.1	3.2	3.4	3.9
量化电平	−1.75	−0.75	−0.25	0.25	1.75	2.25	3.25	3.25	3.75
二进制编码	0100	0110	0111	1000	1011	1100	1110	1110	1111

请注意，凡负电平其高位都是 0，凡正电平其高位都是 1，所以最高位也称作极性码。

2. DPCM（差分编码调制）

我们发现，在 PCM 体系中，每一个采样都是独立量化的，前面的采样值跟后面的量化没有什么关系。实际上，对于话音信号这种非突变信号，这样做是比较浪费的。当话音信号这样的带限信号以奈奎斯特速率或者更高的速率进行采样时，采样值通常是相关的随机变量。也就是说，如果前一个采样值很小，那么下一个采样值很小的概率就很大。如果用差值而不是绝对值进行编码，那么会更有效率。

比如说增量调制 DM 就是 DPCM 方案中的一个版本。在增量调制中，量化器采用的是幅度为±Δ的 1 比特量化器。

如何在发射端形成 $f(t)$信号并编制成相应的二元码序列呢？仔细分析一下图 1.28，比较在每个采样时刻Δt 处的 $f(t)$和 $f(t-1)$的值，可以发现：

当 $f(t)>f(t-1)$时，上升一个σ，发“1”码；

当 $f(t)<f(t-1)$时，下降一个σ，发“0”码。

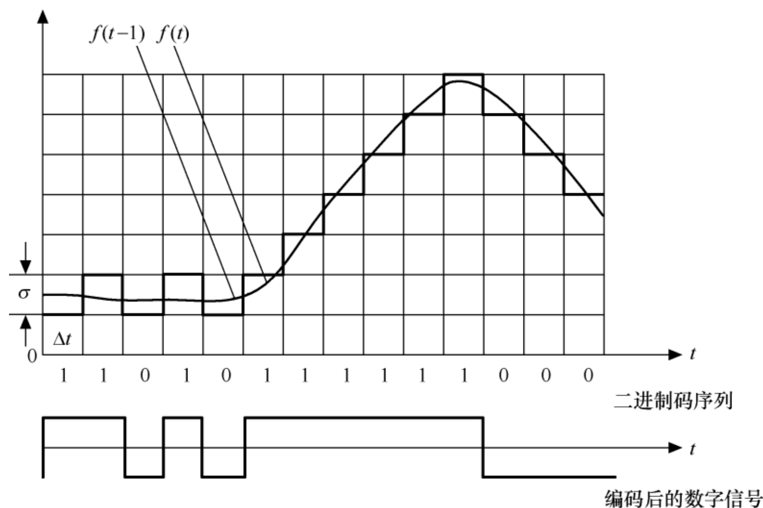


图 1.28 增量调制示意图

刚刚所说的 PCM 和 DPCM 编码都属于信源编码中最简单的编码，那什么叫信源编码？信源编码又有什么作用呢？

信源编码是以提高通信有效性为目的的编码。信源编码的效率通常是通过压缩信源的冗余度来实现的，比如说《在水一方》相对《蒹葭》就有冗余度，那么用信源编码的挑剔的眼光来看，表达同样的信息量前者占用了更多的比特位，那么它就不是一个好的信源编码。



概括一点地说，信源编码追求的是相同信息量的最少比特位。

可是在一个通信系统中要能完成端对端的信号传递，光有信源编码是不够的。这句话有点令人匪夷所思，因为我们刚刚说了只要进行奈奎斯特采样就可以把原始信号无遗漏地完全表述清楚了，为什么这样做还不够？下面简单类比一下。

对于一个通信系统而言，我们可以把它类比成一个教育体系，先且假设发送端是老师，接收端是学生。我们知道，教学体系追求的目标就是让学生完全听懂老师所讲的，那么通信系统追求的就是让接收端无差错地收到发送端发出的信号。

老师的讲课内容可以比作信源编码，一个是对知识的表述方式，一个是对信号的表述方式，没有本质的区别。这样一类比你就会发现，很遗憾，光靠老师的讲课内容是无法达成教育体系的目的的，你上课可能走神，可能有东西没听懂，还可能有东西你没听懂但自以为听懂了，你怎么能保证光凭听课就能保证教学体系的终极目标——完全弄明白老师所讲的内容呢？所以，老师除了授课以外，还安排课后习题让学生自我验证到底学懂了没有。对于通信系统而言也是如此。信源编码在传输过程中可能丢失，可能发生信号变化，比如某些比特从“0”变为“1”，某些比特从“1”变为“0”，你光靠信源编码怎么能达成让接收端无差错地收到发送端发出的信号的终极目的呢。为了达成这个目的，我们就在信源编码的基础上，另外安排了一些冗余的比特当作课后习题一样传给接收端，让接收端自行验证信息是不是都收对了，这些“冗余信息”就称为信道编码。

信道编码是以提高信息传输的可靠性为目的的编码。通常通过增加信源的冗余度来实现。这与信源编码的追求恰好相悖，看起来好像很不可思议。其实信源编码和信道编码其本质追求都是相同的，都是为了实现信号最有效的传输，只不过一个关注的是冗余度，一个关注的是有效性而已。

信道编码通过增加冗余比特的方法来让接收端发现错误，那么接收端发现了错误之后，如何才能对错误进行纠正呢？也就是说你通过课后习题发现了你有些知识理解不对，你怎么才能知道怎样是对的呢？通信系统中设计了如下 3 种方式来进行纠错。

（1）检错重发法：接收端在收到的信码中检测出错误时，立即设法通知发送端重发，直到正确接收为止。也就是说你通过做课后习题发现老师讲的有些内容你理解得不对，于是要求老师再讲一遍，直到你明白为止。这是现代通信系统中主流的纠错方式。

（2）前向纠错法：接收端不仅能在收到的信码中发现有错码，还能够纠正错码。对于一个二进制系统，如果能够确定错码的位置，就能够纠正它，这很好理解，因为二进制就“0”和“1”两个数字，非此即彼。这种方法不需要反向信道（传递重发指令），也不会反复重发而延误时间，实时性好。这种方法就好比你通过做课后习题发现有些知识是你听错了，自己琢磨着就校正过来了。

（3）反馈校正法：接收端将收到的信码原封不动地转发回发送端，并与原发送信码

相比较。如果发现错误，则发送端再进行重发。这种方式效率相当低，一般不怎么用，相当于你把老师讲的课再讲一遍给老师听，她认为没错那么你就没有错。

信道编码在通信中是一个非常重要的课题，与此相关的研究也层出不穷，比如线性分组码、卷积码、Turbo 码、奇偶校验码等。在这里，作者并不打算对这些内容展开论述，而只打算讲讲原理，这么一大串“0010101011111001001”的比特流，它是如何发现自身的错误的，又是如何完成检错的？初看起来有点令人不可思议，继而脑子里一片混沌，有点难以理解，我们还是举个例子来说明吧。

假如有一个 3bit 的编码，那么是可以表示 2^3=8 种编码的。现在我们只用它的两位来表征信息，另一个 bit 作为校验码，那么我们可以表示 2^2=4 个信息。如下所示：

$$\begin{cases} 000=\text{风} \\ 011=\text{雨} \\ 101=\text{雷} \\ 110=\text{电} \end{cases}$$

我们在这里拿最高位作为监督位，后两位作为信息位，也就是“000”表示风，“011”表示雨，“101”表示雷，“110”表示电。其实表征信息两个比特就完全够了，另一个比特是用来进行检错的。

上面任意两个码元都有两位是不同的，那么如果上述某一个信息元一个比特出了问题，都可以检测出来。比如“000”风，如果某一位比特出错，比如变成了“001”或者“010”，那么很快就可以发现在编码体系里没有这个编码，就说明这个码出错了，这就是检错。哪怕只是错了 1 个比特位，上述这种编码方式也是无法自行进行纠错的，比如“100”就是一个错误的信息，但你说它是由“110”错了 1 个比特，还是“101”错了一个比特呢，只知道错了，但是无法进行纠正。

为了纠错，我们不得不再增加冗余比特，如下所示：

$$\begin{cases} 000=\text{风} \\ 111=\text{电} \end{cases}$$

本来表征两个信息只要一个比特就够了，在这里，我们增加了两个比特作为监督位，这样一来，可以实现对 1 个比特错误的纠错。比如出现了“100”的码型，不用说，肯定是 000 的高位发生了错误，因为“111”的码型只错一位是无论如何不会变成“100”的。

在这里我们简单地介绍了一下检错和纠错的原理，如果要进行深入的学习，请参见通信原理的相关教材。

1.5.4 高中低空各有所属—调制的意义

话说采样、量化、信源编码、信道编码都讨论完了，按照 1.2 节勾勒出来的框架，



就该轮到调制了。所谓调制，就是频谱的搬移，以 GSM 为例，你们说话不是工作频率在 200～3 400Hz 吗，那好，我把你们搬迁到 900MHz 上去，而 WCDMA 的话更是要挪到 2 100MHz，这个频谱搬移的过程就称为调制。

这看起来很像吃饱了饭没事做，我在 4kHz 以下频段不是混得好好的吗，你干嘛非要把我搬到那么高的频段上去呢？把基带信号（4kHz 以下的话音信号）转变为频带信号（900MHz）真的有这个必要吗？这样做到底有什么好处呢？

（1）调制技术首先是为了和信道匹配。比如说无线通信中，走的信道就是大气层。对于大气层而言，音频范围（10Hz～20kHz）的信号传输将急剧衰减，而较高频率范围的信号可以传播到很远的距离。所以说要想在依靠大气层进行传播的通信信道上传输像话音和音乐这样的音频信号，就必须在发射机里将这些音频信号嵌入到另一个较高频率的信号里去。

（2）电磁波的频率与天线尺寸要匹配，一般天线尺寸为电磁信号的 1/4 波长为佳。调制可以用来将频带变换为更高的频率，从而减小天线的尺寸。初看这一点没觉得有什么，算算就知道有多吓人，以 4kHz 的话音信号为例，那么合适的天线尺寸是多少呢？

$[(3 \times 10^8 \text{m/s})/4\,000\ 次/\text{s}] \times 1/4 = 18\,750(\text{m})$，这么高的天线，会把飞机撞下来的！！

（3）在高频段更易于采用频分复用，低频段的资源本来就只有那么一些，上面都跑着各色通信系统，比如 AMPS、GSM、PHS、CDMA、集群蜂窝。现在又冒出来什么 WCDMA、cdma2000、TD-SCDMA 那对不起了，低频段的坑就被占满了，没有这么多空间给你们，不如去 2 100MHz 频段吧，那里地方大，宽敞！

下面来讨论一下如何进行调制，由于目前的蜂窝通信均是采取的数字通信技术，因此以下仅仅介绍一下数字调制。

话说我们经过“采样—量化—信源编码—信道编码”得到了一长串的“0101101011”的比特流，该怎么把这串比特流的信息嵌入一个电磁波中，从而在空中发送出去呢？这个信息嵌入的过程称为调制。试想一下，一个电磁信号可以用一个正弦波来表达，而正弦波无非就是 3 个参数，即振幅、频率和相位。想把你的比特流信息镶嵌进去，也只能从这 3 个参数上打主意，别无它法。所以将数字数据转换为电磁信号的基本编码或者说调制技术相应也有 3 种，分别是：幅移键控（ASK，Amplitude Shift Keying）、频移键控（FSK，Frequency Shift Keying）和相移键控（PSK，Phase Shift Keying）。

图 1.29 非常重要，但是或许一下看不明白是怎么回事，我们来逐一看看这 3 种调制方式的表达式就知道了。

1．幅移键控（ASK）

刚刚说了一个载波的三要素：振幅、频率、相位。这算是从第一要素振幅上在打主

意，如何用振幅来表示“0”和“1”两个比特位呢。通常 ASK 方式是采用一个振幅值为 0 的载波来表示比特“0”，用一个振幅值恒定的载波来表示比特 1，如图 1.29（a）所示。结果得到信号的表达式为：

$$\text{ASK} \quad s(t)=\begin{cases} A\cos(2\pi f_c t) & \text{二进制数1} \\ 0 & \text{二进制数0} \end{cases}$$

式中，载波信号为 $A\cos(2\pi f_c t)$。

幅移键控有一个缺点就是容易受到突发脉冲的影响。

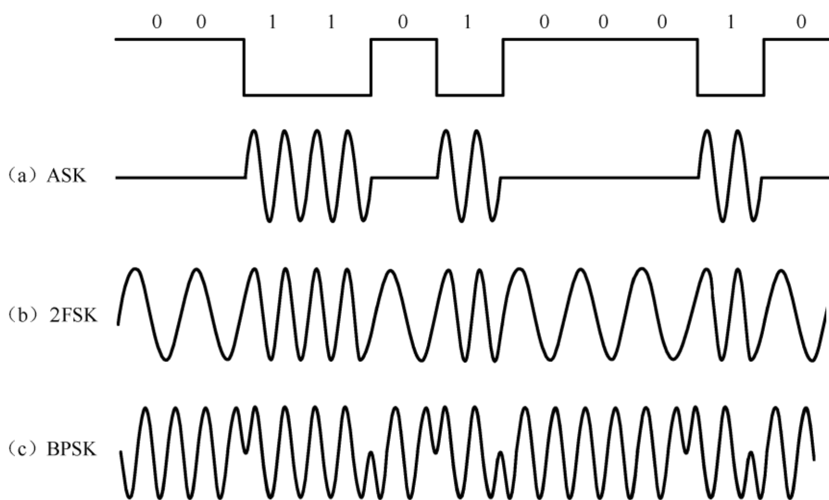


图 1.29　数字调制示意图

2. 频移键控（FSK）

GSM 采用的调制方式 MSK 就是 FSK 中的一种。

频移键控最常见的形式是二进制频移键控（2FSK），它是用载波频率附近的两个不同的频率来表示两个二进制值，请参见图 1.29（b）。表示“0”和“1”的信号的两个载波的频率明显不同，表示“1”的载波的频率要高。信号的表达式如下：

$$\text{2FSK} \quad s(t)=\begin{cases} A\cos(2\pi f_1 t) & \text{二进制数1} \\ A\cos(2\pi f_2 t) & \text{二进制数0} \end{cases}$$

2FSK 的抗干扰能力要比 ASK 强。

3. 相移键控（PSK）

相移键控是无线通信中采用得比较多的，其数据通过载波信号的相位偏移来表示。



最简单的方式是两相相移键控（BPSK），它使用两个相差 180° 的相位来表示两个二进制数，请参见图 1.29（c），“0”信号和“1”信号的表达式如下：

$$\text{BPSK}\quad s(t)=\begin{cases}A\cos(2\pi f_c t+0) & = A\cos(2\pi f_c t)\\ A\cos(2\pi f_c t+\pi) & = -A\cos(2\pi f_c t)\end{cases}$$

由于 180° 的相移等于将正弦波的值乘以−1，那么就得到了上式。

4. 正交幅度调制（QAM）

上面提到的幅移键控、频移键控、相移键控都有一个共同的特点——它们都只调制载波的一个变量，也就是只用载波的幅度、频率、相位中的一个变量来携带比特信息。变量少有它的好处，那就是变化的元素不多，从而识别的难度不大，出现错误的概率也就低；变量少也有它的坏处，那就是承载的信息量不够多。于是乎既调幅度又调相位的 QAM 就横空出世了。在 WCDMA 的后续版本 HSPA、HSPA+以及 WiMAX、LTE 中，16QAM 和 64QAM 得到了广泛的应用。

MQAM 的调制信号可以用下面的公式来表达：

$$S_{\text{QAM}}(t)=A_i\cos(\theta_i)\cos 2\pi f_c t+A_i\sin(\theta_i)\cos 2\pi f_c t\qquad (i=1,2,\cdots,M;\ 0\leqslant t\leqslant T)$$

我们看到，这个公式比 BPSK 也复杂不了多少，无非是振幅由不变的 A 变成可变的 A_i，相位由 0、180° 两个选择变成了更多选择的 θ_i。

通常情况下，我们都用点位图来表示 QAM，这样看起来比较方便，图 1.30 就是一个 16QAM 的相位图。我们看到，在 16QAM 的情况下，一个符号（点位）可以表示 4 个比特的信息，这 4 个比特的信息由横坐标的 2 比特位信息及纵坐标的 2 比特位信息组成。HSDPA 下载峰值速率能达到 14.4Mbit/s，最关键的因素就是调制方式由 QPSK 变成了 16QAM。

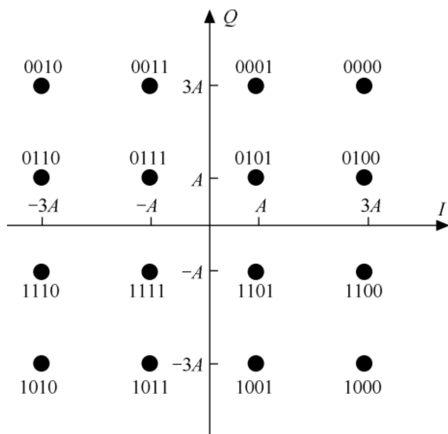


图 1.30　16QAM 点位图

1.6 无线信道之烦恼

这是本章的最后一节了，让我们稍稍总结一下前 5 节的内容，我们到现在为止已经了解了如何对一个通信系统的信号进行分析，如何通过抽样让一个连续的电信号转变成一个离散的高高低低的电平信号，如何通过量化将其转换为一个特定的数字，又是如何



对这些数字进行 PCM 信源编码，信源编码之后，为了保证无差错的传输，再进行一次信道编码。信道编码之后，就形成一串串比特流，最后，我们让这些比特流映射到电磁波的幅度、频率、相位上，从而实现用电磁波承载话音信号的梦想。

考虑到信号的接收基本就是信号发射的反过程，那么一个点对点无线通信系统的梗概我们也基本勾勒出来了。在介绍多点与多点无线通信系统之前，我们有必要介绍一下电磁波传输的介质——无线信道的一些令人头痛的特性。正是这些特性让 GSM、WCDMA、LTE 空中接口的设计变得如此复杂。

提起无线信道，我们可能会关注以下两方面内容，一是它的理论容量，也就是说在既定带宽和信噪比的前提下最大传输速率会是多少；二是它有些什么特性会对通信系统有所影响，比如说大尺度衰落和小尺度衰落。在这里，我们首先来关注一下容量的问题。

一般而言信道上是有噪声的，我们通常关注的是，这些噪声会对传输信号的速率产生多大的限制。我们把信道上可以被传输的最大速率称为信道容量（Channel Capacity）。对于信道容量而言，通常有以下几个概念。

（1）数据率（data rate）：数据能够进行通信的速率，用 bit/s 来表示。

（2）带宽（bandwidth）：指的是传输信号所占的带宽，用 Hz 来表示。我们在日常生活中又常常把数据率（bit/s）称作“带宽”。所以很多人头脑里经常有两股截然不同的势力在打架：一股来自书本，它告诉你“Hz”才是带宽；另一股来自生活，它告诉你“bit/s”就是带宽，我们需要举一个例子来分清楚这两个概念。

以 GSM 为例，它的某一个频道的中心频率是 890.2MHz，那么它的频率范围就是 [890.1MHz，890.3MHz]，共 200kHz，这 200kHz 就是真正意义上的“带宽”，指的是频带宽度，即频谱宽度！在这个频带上，如果采用 GMSK 进行调制的话，那么在这 200kHz 带宽内其调制速率就是 270.833kbit/s。这就是 GSM 传输的**数据率（data rate）**。数据率通常是小于信道容量的，一个信道的容量在没有噪声的理想状态下可以由奈奎斯特准则测算出来，在有噪声的情况可以由香农公式测算出来。这 200kHz 的带宽能承载的**最高数据率**是多少，可以根据信噪比计算出来。

（3）噪声（noise）：我们所讨论和关心的是通信线路上的平均噪声电平，关注的是统计学上的意义，而非单个的突发噪声。

（4）误比特率（error rate）：差错发生率，比如发送的是“0”而接收的是“1”，或者发送的是“1”而接收的却是“0”。

1.6.1 没有噪声的理想国— 奈奎斯特带宽

首先值得注意的是，奈奎斯特带宽指的是信道无噪声的理想情况，这种理想情况在



实际中并不存在，因为再完美的系统你也没办法阻止分子的热运动，除非你想颠覆热力学定理。热噪声或者说高斯白噪声总是如影随形，无处不在的。

在没有噪声的情况下，数据率的限制仅仅来自于信号的带宽。那么奈奎斯特带宽就可以如下描述：如果带宽为 B，那么可被传输的最大信号速率就是 $2B$；反过来说如果信号传输速率为 $2B$，那么频宽为 B 的带宽就完全能够达到此信号的传输速率。这一限制来自码间干扰，有着严格的数学证明，对相关证明感兴趣的读者可以参见参考文献 5 的第 9 章。

在这里大家要注意码元速率（Baud/s）和比特速率（bit/s）的区别。假如说 GMSK 调制（比如 GSM、GPRS），一个码元对应的就是一个比特，那么根据奈奎斯特准则，GSM 200kHz 带宽的最大速率就是 400kBaud/s，在 GMSK 调制情况下也即 400kbit/s，这很理想化，而实际的传输速率为 270.833kbit/s。

1.6.2　有噪声的真实世界— 香农容量

奈奎斯特准则指出，在无噪声的完美信道里，带宽加倍则数据率或者说信道容量也加倍，在没有噪声干扰的前提下，这样的结论的确合情合理。实际上的信道则比这要复杂得多，高斯白噪声（热噪声）、突发噪声、衰减失真都会对信道上传输的信号产生影响，造成信号丢失或者误码等。

在有噪声的情况下，带宽增加就不一定能相应地增加传输速率了，因为带宽越高，由于频带的展宽，相应的高斯白噪声也会增多，对数据的影响也就会相应地增加。

对于一个给定的噪声电平，我们希望通过提高信号强度来提高正确接收数据的能力。在这里，用信噪比（SNR，Signal-to-Noise Ratio）来衡量信号功率相对噪声功率的强度，这个值越大，说明信号越好，我们越容易分辨出信号来。SNR 为信道输出的信号功率 S 和输出高斯白噪声功率 N 的比值，即 $SNR=S/N$。

对于数字传输而言，带宽和信噪比共同决定了一个信道的容量，可以用一个简单的公式来描述，这个公式是由香农推理出来的，这就是著名的香农定理：

$$C = B\,\mathrm{lb}\left(1+\frac{S}{N}\right)$$

由于高斯白噪声的功率 N 与信道带宽 B 有关，若噪声的功率谱密度为 n_0，则功率噪声 N 将等于 n_0B。因此，我们可以将香农公式转化为：

$$C = B\,\mathrm{lb}\left(1+\frac{S}{n_0B}\right)$$

从这个关系式就可以清楚地看出，增大带宽 B 不一定就能使 C 不断增加，甚至当 B

趋近无穷大时，C 是一个给定的有限值，对此可以给出数学上的证明。

$$C = B\,\mathrm{lb}\left(1+\frac{S}{n_0B}\right)=\frac{S}{n_0}\times\frac{n_0B}{S}\mathrm{lb}\left(1+\frac{S}{n_0B}\right)$$

当 $B\to\infty$ 时，则上式变为：

$$\lim_{B\to\infty}C=\lim_{B\to\infty}\left[\frac{n_0B}{S}\mathrm{lb}\left(1+\frac{S}{n_0B}\right)\right]\left(\frac{S}{n_0}\right)=\mathrm{lb}\,\mathrm{e}\left(\frac{S}{n_0}\right)\approx 1.44\frac{S}{n_0}$$

由此可见，当 $\frac{S}{n_0}$ 保持一定时，即使信道带宽 $B\to\infty$，信道容量 C 也是有限的，这是因为信道带宽 $B\to\infty$ 时，噪声功率 N 也趋于无穷大。

香农定理指出了达到一个既定信道的最大容量，却没有提及如何去实现它，所以香农容量暂时只是一个衡量实际通信系统性能的尺度。

另外，上述关于信道噪声的讨论都是以高斯白噪声为前提的，对于其他类型的噪声，香农公式需要加以修正才能适用于实际的情况。

1.6.3　高山、大楼及其他—　大尺度效应

讨论完容量之后，我们来谈谈无线信道的两个很要命的特性，大尺度效应和小尺度效应。贝尔相对而言是比较幸福的，他研究的是固定电话，而有线信道比无线信道要简单得多。就以同轴电缆为例，它的里面用金属承载信号，外面用塑料进行绝缘，信号就在里面传输，其信道的物理特性自出厂起就是比较恒定的，虽然随着岁月的变迁质量会有所下降，但是总体而言变化不大。所以我们通常也称有线信道为恒参信道，也就是说各项参数是不变的。

而无线信道就大不相同了，无线信道的物理特性没有一刻是恒定的，总是处于不断变化中，也称作变参信道。对于无线信道而言，最要命的特性莫过于衰落（fading）现象：由于多径效应引起的小尺度效应，以及由距离衰减引起的路径损耗或者障碍物造成的阴影等大尺度效应。

所谓大尺度效应，也称大尺度衰落或者慢衰落，是比较好理解的一种，因为我们很容易找出直观的东西来和它类比，那就是光波，请记住了，光波也是电磁波，只不过是频率不同的电磁波而已，所以有很多东西是比较类似的。

电磁波的电场会因为距离而衰减是显然易见的，光波也是如此，一束手电筒的光照向夜空，要不了多远就基本看不到了。一是因为电磁波在空中四散传播，发散了，另一点是因为路径造成了能量的损耗，在无线通信中也有类似的效果。

因为路径造成的场强的损耗遵循自由空间传播模型。什么叫自由空间传播模型？它是做什么用的？自由空间传播模型一般用于预测接收机和发射机之间完全无阻挡的视距



路径时接收信号的场强，比如卫星通信系统和微波视距无线链路就是典型的自由空间传播。自由空间中距发射机 d 处天线的接收功率由 Friis 公式给出：

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}$$

式中，P_t 为发射功率；$P_r(d)$ 为接收功率；G_t 是发射天线增益；G_r 是接收天线增益；d 是发射机与接收机之间的距离，单位为 m；L 是与传播无关的系统损耗因子（$L \geqslant 1$）；λ 为波长，单位为 m。其中天线的增益与天线的有效截面 A_e 相关，即

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

由自由空间公式可知，接收机功率随发射机与接收机距离的平方而衰减，即接收功率衰减与距离的关系为 20dB/10 倍程。

上面我们讲的就是路径传播损耗，它反映出传播在宏观大范围（千米量级）的空间距离上的接收信号电平平均值的变化趋势。路径损耗在有线通信中也存在。下面介绍另一种大尺度效应，那就是阴影效应。它主要是指电磁波在传播路径上受到高山、大楼等的阻挡而产生的损耗，它反映了在中等范围内（数百波长量级）的接收信号电平平均值起伏变化的趋势。这类损耗一般为无线传播所特有。它服从对数正态分布，其变化率比传送信息率慢，故称为慢衰落。阴影效应在光波里也有，比如你拿一张纸遮住日光灯的灯光，那么从纸背面透过来的灯光就明显弱了很多。

由以上内容可以看出，所谓的大尺度和小尺度，是按照波长来进行划分的。

1.6.4　波峰、波谷及其他—　小尺度效应

小尺度效应又称小尺度衰落、快衰落。它反映了移动台在极小范围内（数十波长以下量级）移动时接收电平平均值的起伏变化趋势。当接收机移动距离与波长相当时，其接收功率可以发生 3 个或 4 个数量级（30dB 或 40dB）的变化。

小尺度效应一般是由多径传播引起的。所谓多径传播，指的是同一传输信号沿两个或多个路径传播，以微小的时间差到达接收机的信号相互干扰。快衰落包含许多类型，如果想要详细了解，请参见参考文献 6 的第 5 章。在这里，仅仅举个例子说明小尺度衰落对于无线通信的危害，让大家有一个直观的认识。

图 1.31 所示的快衰落称为瑞森（Rician）衰落。所谓瑞森衰落就是指除了有间接的多径信号以外，还有直接的 LOS 路径（即视距路径），通常瑞森衰落的结果没有图 1.32 那么惨，因为直接路径的信号强度要强于间接路径，不会出现完全抵消的情况。



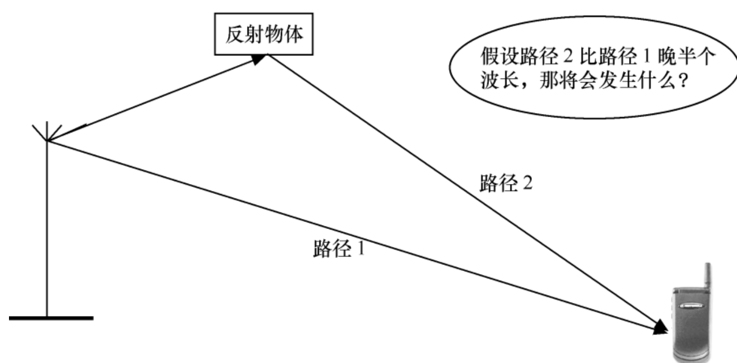


图 1.31　小尺度衰落

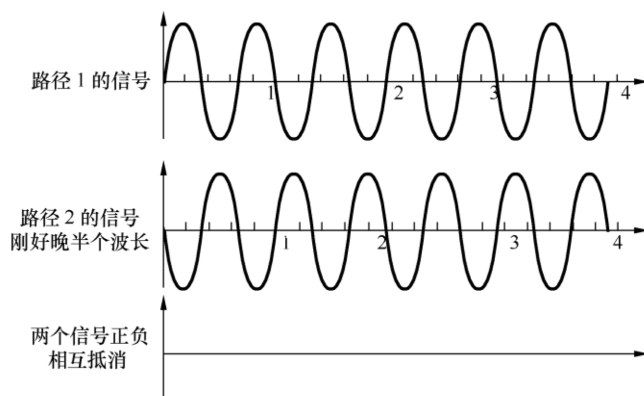
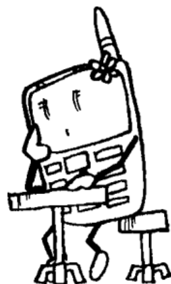


图 1.32　半波长的信号正负相互抵消

第 2 章
Chapter 2



从电台到大哥大

无线通信可以说有 3 个层面。第一个层面是点对点的无线通信，比如说电台，又比如说对讲机；第二个层面是点对多点的无线通信，比如说基站和手机之间，一个基站要和多个手机实现通信，它是建立在点对点无线通信基础之上的，但是除此之外它又要考虑复用、功控、同步等多个附加因素，相对第一个层面要复杂；第三个层面是多点对多点的无线通信，比如说 WCDMA 中多个基站与多个手机的关系，一个基站要与多个手机进行通信，一个手机也可能与多个基站之间进行通信，要考虑的因素就更多了，但它也是以第一个层面和第二个层面为基础的。

我们在第 1 章中，已经基本勾勒出了第一个层面无线通信的轮廓，在这一章里，我们要来讨论一下点对多点的无线通信和多点对多点的无线通信。作者希望一步步由简到繁地去分析搭建一个无线通信网可能会遇到的问题，通过这种方式让大家对于无线通信网有一个清晰的认识和基本的概念。

2.1 电台的梦想— 点对点的无线通信

“千里眼”、“顺风耳”，这是人们梦想了几千年的通信方式。它们因马可尼的发明而成为现实，马可尼也因此载入通信的史册成为不朽。但是大家要注意到，“千里眼”和“顺风耳”都是《封神演义》里面描写的天神，古人虽然想象力丰富，但是依然没有梦想过每个人都拥有这样的能力，只是想象这样的能力应该是属于神的。到了今天，我们的梦想可以在古人的基础上再往前走一步。

马可尼发明电报后，军队、政府机构、大型企业开始拥有这种远距离通信设备，可以实时地进行沟通，但是并不是每一个人都能享受到它的好处。于是，一个新的梦想诞生了，这个梦想不只属于神，而是属于每一个人，那就是“让任何人在任何时间任何地



点可以和任何的另外一个人交换任何信息”，听起来很拗口，翻译成通俗一点的话就是“我想要一个手机”！这个梦想在今天看起来很简单，几百块钱就能解决，但是把历史的页卷翻到 1940 年，那个没有移动通信网的年代，你还会觉得简单吗？

那好，我们的问题就来了，现在把你放到 1940 年，你想拥有一个手机，能够随时随地和你女朋友打电话、诉衷肠，请思考一下你该怎么办？不要求描述具体的细节，但是要讲出大致的思路。

2.1.1 无线通信组网构想一：用无线电台可以构成一张无线通信网吗

在 1940 年，你看不到 Theodore S.Rappaort 的《无线通信原理与应用》，也读不到 Harri Holma 的《UMTS for WCDMA》，你的所有学识和经验，只来源于你那个时代。凭空想象一个新的东西总是很困难的，于是，你总会从你身边已有的东西上面寻找线索，那么，你有了这样一个美妙主意——**既然无线电台就可以实现远距离的无线通信，那么给每个人发一个电台行不行？**

有这个想法一点也不奇怪，1940 年，第二次世界大战开始了，电台的使用可是频繁得很，我们拿电台来对照一下我们那个“五个任何”的梦想。

（1）任何人：如果国家足够有钱，给每个人发一个电台确实不是什么遥不可及的梦想；

（2）任何时间：只要你的电台不是山寨货，那么在保质期内任何时间工作不歇菜也不是一件很困难的事情；

（3）任何地点：日本袭击中途岛的电报竟然能被千里之外的美国截听到，说明在地球上绝大多数地方收发电报都没太多问题；

（4）任何信息：这个有点困难，第二次世界大战时，无线电台打打电话是没有什么问题的，你也可以用莫尔斯电码代替短信，但是要发彩信啊，传视频啊，显然那个时候的无线电台完成不了这样的工作。但是这毕竟是 1940 年年，不是 2012 年，每个人都能打电话相对只有军方政府企业能用已经大大进步了，不能要求那么高，是不是，咱们得知足。

上面的解释看起来很完美，可是事情真是这样吗？

首先因为要考虑发射电报“任何地点”都能收到，发射功率就得很大，嗓门够大，才能穿透层层阻碍，从日本太平洋舰队传到美国五角大楼。发射功率一大，这电台的体积就小不了。我们首先从图 2.1 和图 2.2 来看看电台和步话机的大小，相信大家都从电视里或者博物馆里看到过，应该对它有个比较直观的认识。

先不谈别的，这样大小的一个铁疙瘩，背在身上可不是一般的沉，拿这玩意当手机估计一般人还真承受不了。说到这里估计有人要反驳，随着技术的进步，这电台也许将来有一天可以变得很小，可以握在我们掌中，到时候不就成了，现在有点不方便，大家



还是可以将就的嘛。



图 2.1　无线电台



图 2.2　第二次世界大战时的步话机

事情果真是这样的吗？

我们来看看电磁波在空中的传播，如图 2.3 所示，电磁波在空中是向四面八方发射的，在同一频段的电磁波是会互相干扰的。这个理由其实不难明白，比如人说话的频段一般在 20～3 400Hz，如果好几个人同时跟你说话，那么你要分辨起来就有点困难，因为他们的声音都在同一个频段，会互相干扰。如果是一个人和一只蝙蝠同时向你吼嗓门，那么就不存在干扰的问题，因为蝙蝠发射的是 20kHz 以上的超声波，跟人发声的频段差得远。

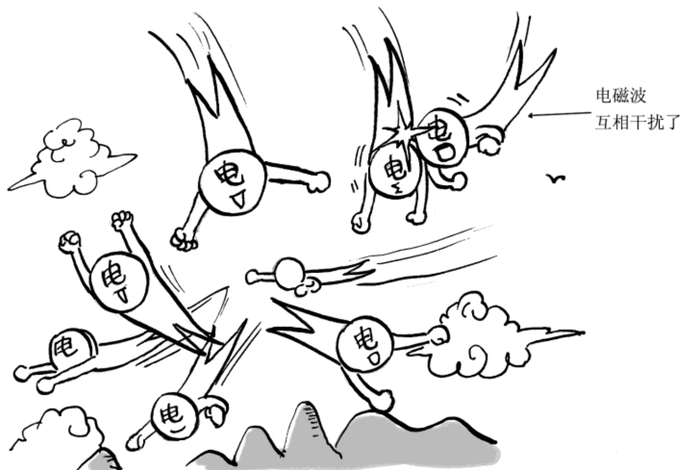


图 2.3　两个发射源传送电磁波互相干扰

哦，原来障碍在于这些电台不能用相同的频段，既然如此，我给全球所有的电台都分配不同的频段不就行了么。假设一个电台需要占用 25kHz 的频段，全球有 20 亿人需

要用电台打电话，那么只需要 25kHz × 2 × 10^{10}=5 × 10^5GHz 频段的带宽分配给全球这些人用也就够了，有什么问题吗？

聪明的同学或许发现了，这样做存在一个很大的漏洞，那就是“我怎么才能知道张三在哪个频段上呢？”在第二次世界大战的各支军队里，这种每个电台用不同频段的方法之所以还奏效是因为要管理的通信单元还不够多，就算每个连配一个电台，一个连以200 人为单位，那么一支 100 万人的军队，也许 5 000 个电台就够了，就拿本子记，问题也不是太大，但是当通信单元达到 20 亿个，假如 1 页可以记录 100 条对应关系，也得 2 000 万页，这得是一本多厚的本子！或许还有人要争辩，随着数据库技术的发展，我将来也许可以把这 20 亿条信息都存到手机里，问题不就解决了。

好，就算数据库建立了，一个要命的问题也来了，如果在这 20 亿人之外新增了一个手机用户名叫李四，其他 20 亿人如何才能知道他用的哪个频段？如何才能找到他？难道一个个通知 20 亿人刷新数据库么……

又有聪明的人想到了，可以建立一个中央数据库，大家定时去那里下载最新的就是了。好吧，虽然困难，虽然麻烦，倒是好歹还是有解决办法的。但是也就是说，到现在为止，我们用电台来实现个人通信的想法虽然千疮百孔，但是问题还只是不好用，或者说很难用，不是不能用。

接下来，真正的也是最致命的挑战来了，我们面临的一个现实问题直接否决掉了这个方案，那就是，适宜于无线通信的频段很少，完全不够用，想从中分出 5×10^5GHz 给大家来实现个人通信，那纯属一件扯谈的事情（原因在 2.1.2 小节中解释）。

电磁波在同一频段的干扰造成了无线频段资源的有限性，而无线通信频段资源的有限性则构成了无线通信各种解决方案的约束条件。不论在我们虚构的这套电台解决方案里，还是在后面的 GSM、WCDMA、TD-SCDMA、LTE 乃至所有的无线通信领域，大家都会深刻领会到——无线资源的频段是稀缺的，是有限的。而正是这种稀缺性和有限性给我们造成了巨大的麻烦，并且导致了我们采取各种技术手段来克服它，这一点请大家务必牢记！我们一直在说频谱资源很有限，那么到底有多有限呢，请看下面的分析。

2.1.2　资源是有限的—　适于组网的无线频段

我们首先来看一下 ITU 按照电磁波频率或者说波长定义的电磁频谱系，如图 2.4 所示。

适宜于无线通信的波长，按 ITU 的定义，是从长波至微波不等，也就是自 30kHz 至 300GHz 不等，我们在 2.1.1 小节建立的虚拟的电台通信系统，需要 500 000GHz，显然是没有办法满足的。而要进行远距离的电台点对点通信，微波都不太适用，也就剩下长波到短波这一段了，资源都可以以 MHz 来计算了，比起 500 000GHz 来，基本可以算是



杯水车薪。

频率	赫兹（Hz）3	30	300	千赫兹（kHz）3	30	300	兆赫兹（MHz）3	30	300	吉赫兹（GHz）3	30	300	太赫兹（THz）3	30	300	拍赫兹（PHz）3	30	300
频段	极低频	超低频	特低频	甚低频	低频	中频	高频	甚高频	特高频	超高频	极高频	至高频						
	无线电波											红外线			可见光	紫外线	X 射线	γ射线
波段									微波									
	极长波	超长波	特长波	甚长波	长波	中波	短波	米波	分米波	厘米波	毫米波	丝米波						
波长	兆米（Mm）100	10	1	千米（km）100	10	1	米（m）100	10	1	毫米（mm）100	10	1	微米（μm）100	10	1	纳米（nm）100	10	1

图 2.4　电磁频谱系列

在无线频谱资源这一节里，我们要搞清楚两件事情，一是长波、中波、短波的用途，因为它们在生活中应用很广泛；二是几个主流移动通信比如 GSM、CDMA、WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000 所使用的频段，这是我们日常工作中可能经常要打交道的事情。

长波主要沿地球表面进行传播，又称地波；也可在地面与电离层之间形成的波导中传播。传播距离可达几千千米甚至上万千米。长波能穿透海水和土壤，但波长越长，干扰噪声也越大。长波多用于海上、水下、地下的通信与导航。比如说潜艇，一般就用长波进行通信。也许有人会问：潜艇为什么一定要依赖长波台呢？因为无线电短波、中波都不能进入水里，只有长波能进入水下，最深可达 40 多米，这样遨游碧波下的潜艇，就不必浮出海面来接收陆地上的统帅部的指令了，在水下就可收到，从而能更好地完成隐蔽和作业。



中波在白天主要靠地面传播，夜间也可由电离层反射传播，主要用于广播和导航。一般中波广播（MW，Medium Wave）采用了调幅（AM，Amplitude Modulation）的方式，所以在不知不觉中，MW 和 AM 之间就画上了等号。实际上 MW 只是诸多利用 AM 调制方式的一种广播，像在高频（3～30MHz）中的国际短波广播所使用的调制方式也是 AM，甚至比调频广播更高频率的航空导航通信（116～136MHz）也是采用 AM 的方式，只是我们日常所说的 AM 波段指的就是中波广播（MW）。

短波主要靠电离层反射的天波传播，可经电离层一次或几次反射，传播距离可达几千千米甚至上万千米。适用于应急、抗灾通信和远距离越洋通信。

微波主要是以直线视距传播，但受地形、地物及雨雪雾影响大。传播稳定、传输带宽宽，地面传播距离只有几十千米；能穿透电离层，对空传播可达数万千米。主要用于干线或支线无线通信、卫星通信。在本书中，主要关注的是微波的 300MHz～3GHz 这一段，因为它是当前移动通信网组网的主要频段。

在中国，GSM 的频段是这样划分的。

PGSM 900M 频段：上行 890～915MHz，下行 935～960MHz，上下行各 25MHz 频宽，其中上下行之间 45MHz 间隔；

EGSM 900M 频段：上行 880～890MHz，下行 925～935MHz，上下行各 10MHz 频宽，其中上下行之间 45MHz 间隔；

GSM1800 的频段上行链路为 1 710～1 785MHz，下行链路为 1 805～1 880MHz，上下行各 75MHz 频宽，其中上下行之间 95MHz 间隔。

具体到中国移动和中国联通又是这样区分的。

中国移动：

900M 频段——上行 885～909MHz（5MHz EGSM 频段+19MHz PGSM 频段）；

1 800M 频段——上行 1 710～1 725MHz，下行 1 805～1 820MHz。

中国联通：

900M 频段——上行 909～915MHz（6MHz PGSM 频段）；

1 800M 频段——上行 1 740～1 755MHz，下行 1 835～1 850MHz。

在 CDMA 的 IS-95 标准引入中国并由中国联通运营后，国家给 CDMA 也划分了 10MHz 的频段，那就是：上行 825～835MHz，下行 870～880MHz，和 GSM900M 一样，上下行之间的间隔也是 45MHz。

2009 年 1 月 7 日，工业和信息化部为中国移动、中国电信和中国联通发放了 3 张第三代移动通信（3G）牌照。其中，中国移动获得 TD-SCDMA 牌照，中国联通和中国电信分别获得 WCDMA 和 cdma2000 牌照，3 大标准的频段也随之敲定。

其中，中国移动的 TD-SCDMA 获得了 1 880～1 920MHz，2 010～2 025MHz 两个频



段，其中 1 880～1 920MHz 原用于发展小灵通，小灵通 2011 年年底清频退网后此频段划归 TD。值得注意的是，TD-SCDMA 是 TDD 方式，所以不像我们上述的 GSM 和 CDMA 有上下行频段之分。

中国联通的 WCDMA 获得了上行 1 940～1 955MHz，下行 2 130～2 145MHz，上下行各 15MHz 频宽，其中上下行之间 90MHz 间隔。

中国电信的 cdma2000 获得了上行 1 920～1 935MHz，下行 2 110～2 125MHz，上下行各 15MHz 频宽，其中上下行之间 90MHz 间隔。

2.1.3　无价的战略资源—　无线频谱资源的价值

读者看到 2.1.2 小节的时候或许会有一种昏昏欲睡的感觉，通篇都是一些数字，似乎除了翻出来查一下移动、联通、电信的频段之外毫无其他价值。但是作者必须强调，这些数字背后隐藏着一个巨大的玄机不易被识破，那就是频率资源是运营商最重要的战略资源之一，其拥有的频谱资源的多少直接决定了其网络能够承载多少用户，进而影响其建网方式、市场定位、营销策略、广告宣传等一系列关键战略。

在中国，频谱资源的价值并不是很容易识别出来，因为它是通过行政命令的方式分配的。行政命令背后各运营商的博弈不像商业上的博弈一样透明和容易量化，而像欧洲或者其他一些地区的频谱资源是政府拿出来拍卖的，那么从拍卖价高低我们一眼即知频谱资源的价值。

以德国电信为例，为了获得 3G 的 10MHz 频段竟然花了 77 亿美元，每 1MHz 频段价值 7.7 亿美元。7.7 亿美元相当于什么概念，当前的国际黄金价格约为 47 美元每克，7.7 亿美元可以买 16 吨黄金。1MHz 频率相当于 16 吨黄金，是不是比黄金圣斗士还牛。

话说到这里问题就来了，这个频率资源为什么会这么值钱呢，答案和 2.1.1 小节中所说的一样：电磁波在同一频段的干扰造成了无线频谱资源的有限性，各种无线制式对有限的频谱资源的争夺造成了它的高价值。凡是供给有限而日常生活又大量需要的，比如说石油，基本就便宜不了。既然说无线频谱资源的有限性是由于电磁波在空中会相互干扰而造成的，那么电磁波在空中的干扰又是怎么回事呢？

无线通信中传递信号的电磁波，如同太阳光一样，是向四周发散传播的，其传播方式在视距的情况下遵循自由空间传播模型，如果两个信号频率相同，离得也不是太远，那么它们就必定会在空中遭遇，从而造成干扰；而有线通信中传递信号的电磁波，却可以控制其传播路径，一条线路上的信号对另一条线路上的信号完全没有干扰。

比如说同轴电缆，几根同轴电缆往往套在一个大的保护套内，如图 2.5 所示。同轴电缆的外保护套是接地的，故外部噪声很少能进入其内部，从而避免了干扰。

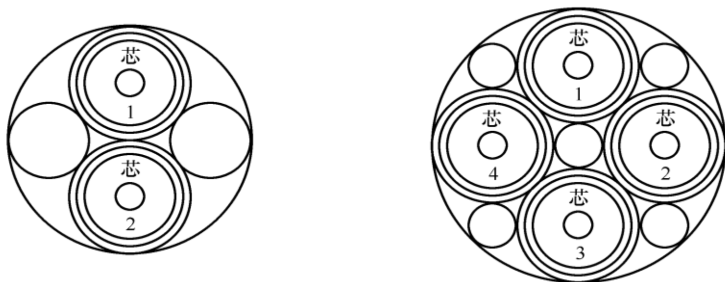


图 2.5　同轴电缆

又比如说光纤，现在大容量高速率的有线通信几乎都以光缆作为载体。如图 2.6 所示，该图为光纤的剖面图，其芯线的直径为 $2a$，包层的直径为 $2b$。芯线的折射指数为 n_1，包层的折射指数为 n_2，利用折射指数的不同保证光一直在光纤内传输。

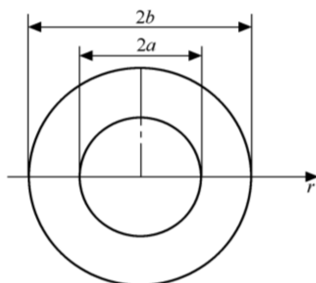


图 2.6　光纤剖面图

对于无线信道，情况比有线信道要复杂得多，我们没有办法改变电磁波在空气中的传播特性，既然无法有效地控制信号的传播路径，那么自然也就无法有效地控制同频率的信号与信号之间的干扰。既然无法控制干扰，那么某个运营商用了其中一个频段在全国组网运营，其他运营商就不能再用这个频段，否则两家就会干扰得一塌糊涂。这就是大家要通过拍卖会争夺频谱资源的原因。

除此之外，无线频谱由于其在空中的无线特性不同，还有“黄金频段”一说。比如 CDMA 所在的 800MHz 频段以及 GSM 所在的 900MHz 频段，相对 1 800MHz 频段其穿透墙体和其他障碍物造成的损耗就要小得多，所以也被称作“黄金频段”。

国家已经分配给了中国电信 1 920～1 935MHz 来承载 cdma2000 业务，但是电信目前依然用 800MHz 频段来承载 3G 业务，也就是因为这个频段的资源更优质。由于历史因素，中国移动在 900MHz 频段一共获得了 885～909MHz 这 24MHz 频谱，相对中国联通 909～915MHz 这总共 6MHz 的频宽而言频谱资源要丰富得多，自然其网络能承载的用户数也就更多。有德国电信的例子在前，各位读者也可以在心里盘算一下 18MHz 频谱值多少钱。

2.1.4　无线通信组网构想二：参照广电网络的架构行不行

我们在 2.1.1 小节中已经用频谱资源有限的理由把用电台搭建无线通信网的想法给否决了，一时间大家是愁眉苦脸，在 1940 年那个时代，除了电台，跟通信沾边的事情也想不到别的了，没什么思路。也罢，我们把时间拨到 1985 年，这个时候距离马可尼发明无



线电报已经整整 90 年了，但是那时中国暂时也没有移动通信网，大哥大也是在两年后的 1987 年才出现，在这个时间点上，我们又会不会有新的思路呢？

有的！中国这时候黑白电视已经逐渐开始进入寻常百姓家，这个时候的电视是通过天线来接收无线信号的，而不是像后来一样是通过有线闭路接入。广电在每个城市几乎是最高的地方建一个发射塔，向四面八方发射信号。电视机作为接收终端，接收广电的信号，并解调出来，就出现了电视画面，你不妨把这个过程也看作“通信”，毕竟有收有发，有调制有解调，跟通信还是有那么一点神似。不仅电视，城市里的广播电台也是采取这种模式。如果把电视和广播电台也看作“通信”的话，那么我们在 1985 年来搞移动通信网也就不能算完全无先例可循了，我们能不能复制一把广播电台这种模式呢？

这个主意看起来不错，至少我们在前面担心的终端个头的大小现在看起来不是问题，因为手持收音机的大小跟大哥大也差不多。那就这样吧，我们参照一把广电的模式，在每个城市里竖一个发射塔，然后手机终端的设计就参照收音机，是不是就可以组成移动通信网了呢？

可能有人觉得对于移动通信而言，一个城市一个发射塔是不够的，因为移动通信用的是 900MHz 这样比较高的频段，而 900MHz 的绕射能力不如低频的中波和短波，那么我们就多建几个发射塔吧，比如一个城市 3～4 个，是不是就可以了？事实上，参照广电网搭建移动通信网这件事情还真不是我们在这里空谈，早期的移动通信系统还真是这么干的。20 世纪 70 年代在纽约建立了贝尔移动系统。这个系统建在高塔上，用大功率的发射机来获得一个广覆盖，最广可以覆盖 2 800km^2！这比整个上海的城区面积还要大！

一个发射机就能覆盖 2 800km^2 的距离，让这么广大地区的人民可以享受随时随地通信的快乐，真是一件功德无量的事情。然而，这个通信系统有一个致命的缺陷，它竟然只有 12 个频道，只能容纳 12 个用户同时通话。也就是说，虽然它满足这个区域的人们“任何时间”、“任何地点”通信的梦想，但明显不能满足“任何人”和“另外一个任何人”通信的需求。

广电模式不是运行得好好的么，一个广电的发射塔不是可以让千家万户看上电视么，怎么到了电信运营商这里这种模式就走不通了呢，问题出在哪里？

我们来看看广播和通信这两个词在英文里的区别，广播叫做“Broadcast”，英文单词直译是广泛地扔，只需要发射塔向电视机发射信号，不需要电视机向发射塔反馈信息。假设现在在 100MHz 的频段上给某个电视台分配 25kHz 的带宽（从 100.000MHz 到 100.025MHz），那么只需要发射塔来占用这 25kHz 带宽发射就好了，所有电视机只接收信号不发射信号，也就是说一个城市只有一个发射源，这当然是不会产生干扰的，如图 2.7 所示。

而通信这个词，在英文里叫做“Communication”，所谓“Com”，是指交互的意思，



不仅发射塔要给用户终端发送信息，用户终端也要给发射塔发送信号！问题就来了，假设现在只有一个用户终端要和发射塔交互信息，那么发射塔还是如上述所示占用“从 100.000MHz 到 100.025MHz”所示带宽，由于这 25kHz 已经给发射塔发射的信号用了（也称作下行信号），那么用户终端就不能再占用这 25kHz 的带宽给发射塔发射信号了，于是，用户终端对应地找一个频段，假设是“从 50.000MHz 到 50.025MHz”的 25kHz 的带宽来发射信号（称作上行信号）。这只是第一个用户，出现第二个用户怎么办呢？

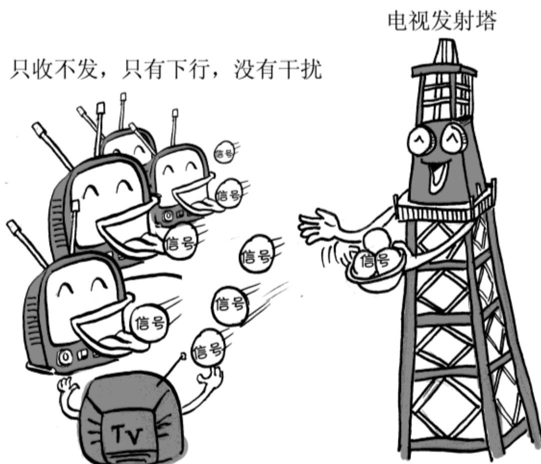


图 2.7　广电模式，只有下行，没有干扰

如果说需要交互是电信模式和广电模式的第一个区别，那么每个用户的信息都各不相同则是电信模式和广电模式的第二个区别。早期的时候，可能只有一个电视台，每个用户看到的台都是一样的。当有用户想看第二个电视台的时候，广电就增加一个“频道”，也就是说增加“从 100.025MHz 到 100.050MHz”的带宽，用于承载第二个电视台的信息，所谓 CCTV-1 到 CCTV-13，就是通过将信号运行在不同的频段里来实现的。

同样，当出现第二个电信用户终端的时候，电信的发射塔也需要增加一个“频道”，也即增加“从 100.025MHz 到 100.050MHz”的带宽。不同的是，这个终端用户上行也需要增加同样多的带宽，即“从 50.025MHz 到 50.050MHz”。假如说给贝尔移动系统上下行各分配 300kHz 的带宽，那么能支持的用户数也不难算出，300kHz/25kHz = 12 个用户。

300kHz 或许显得不是特别多，但是读者可以设想一下，在这种模式下如果要支持 3 000 个用户、30 000 个用户需要的带宽又将会是多少？显然，这个模式是不足以满足现代无线通信的需要的。于是，先行者们想出了一个办法——降低发射塔的发射功率，缩小覆盖半径。**这样可以让同一个频段在不同的空间内得到重复利用，称之为空分复用。原来我可以覆盖 2 800km^2，我现在只覆盖 2.8 km^2 总行了吧，这 2.8 km^2 或许只有**



30 个用户需要同时打电话，那么我只需要上下行各分配 30 × 25kHz = 750kHz 就行了。这样，就形成了现代无线通信系统的雏形，如图 2.9 所示。覆盖同样的面积，图 2.9 所示的移动通信系统相对贝尔移动系统发射塔数量增加了 100 倍，同时在相同频谱带宽内能支持的用户数也大大增加（没有 100 倍，因为电磁波不可能控制得那么完美，不同发射台覆盖的区域完全无重叠，无干扰）。这些发射塔通常意义上也被称作**基站**。基站和基站之间的用户怎么实现通信呢？会有更上一级的通信设施基站控制器（BSC，Base Station Controller）乃至移动交换中心（MSC，Mobile Switching Center）进行处理，那是后话。

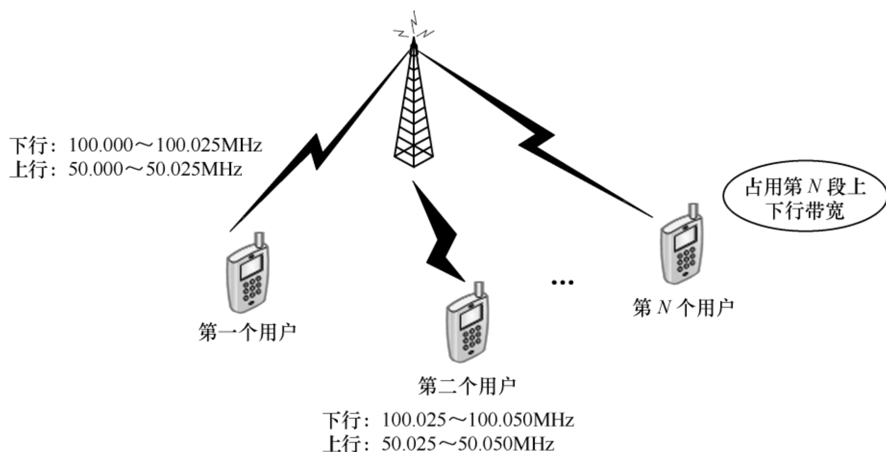


图 2.8　贝尔移动系统，从 1、2 到 N 个用户

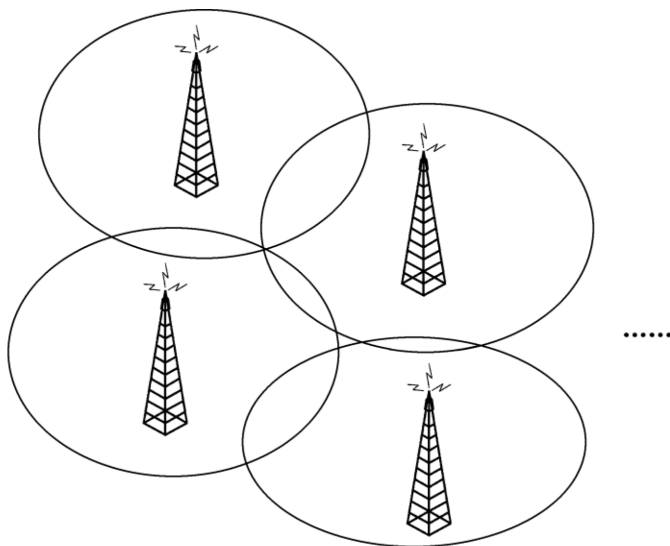


图 2.9　现代移动通信系统雏形

2.2 基站的困惑— 点对多点的无线通信

应当说，到图 2.9 的时候，我们“五个任何”的梦想，也基本能够实现了，但是依然有很多问题有待我们去解决，很多细节有待我们去完善。发现问题和解决问题的过程可以给我们带来很多启迪，也可以加深对无线通信网的理解。希望读者可以和作者一起来思考，品味通信里的智慧和美感。我们看到图 2.9 所给出的现代移动通信系统的雏形，其中是有很多基站的，但为了简单起见，我们先来讨论一个基站下手机的活动情况，再考虑多个基站之间的协作问题。

2.2.1 困惑之一：基站下不止一个手机

我们知道，对现代无线通信系统的一大要求就是要“任何人”在“任何时间”都可以接入系统。这两个“任何”就意味着通信系统的容量必须要足够大，在 2.1 节中贝尔移动系统的设计者们已经想出来了多建基站，控制基站的发射功率和覆盖距离，从而让总容量大大增加的方法，这在通信里面也叫做“空分复用”。但是仅仅有空分复用还是不够的，因为基站的建设费用毕竟是很高昂的，一味地靠增加基站的数量来解决容量的问题就成本而言很不划算，这还只是一方面；另一方面是，基站覆盖范围越小，电磁波的传播路径就要控制得越精确，从而尽量避免基站之间的干扰，这在实际工作中操作起来非常难；再者，基站覆盖范围过小，基站数量太多，会造成大量的切换，这对于移动通信系统而言不是很有利。

基于上述种种理由，我们必须提高单个基站的容量，那么有什么好的办法呢？据说这个问题也让 GSM 的创始人很头疼，在处理新增用户接入的问题上，GSM 和贝尔移动系统是一脉相承的，每新增一个用户，就给这个用户分配 200kHz 的频宽（GSM 的频宽是 200kHz），这种操作方式也叫做频分复用（FDM，Frequency Division Multiplexing）。所谓频分，就是把一段频谱切成 N 块，每块分给一个载波，让这个载波去承载用户。在这个阶段，我们可以把一个载波理解为一块载频，载频的形状如图 2.10 所示。很多人可能没有去过基站，不理解载波的概念，你不妨把一块载频当成一个电台，其主要工作之一也就是发射信号。一个电台是可以给 N 个用户服务的，因为每个用户听到的内容都是一样的；而一个载频就只能给一个用户服务（假设只有频分，没有时分和码分），因为每个用户通话的内容都是不一样的，在此时还没有办法在一个载波上共存。看到这里，就理解通信“Communicaiton”相对广电“Broadcast”的烦恼之所在了吧。广电里一个电台可以让成千上万的用户收听到广播，而在通信里这么大一块铁疙瘩只能给一个用户使用，



亏大了！



图 2.10　摩托罗拉的第二代载频

我们把问题再具体化一点，直接给运营商算算账。假如一个运营商有 10MHz 的频宽，那么在不考虑其他基站对本基站干扰的极端理想情况下，一个基站的最大容量也只有 10MHz/200kHz=50 个用户。如果考虑到干扰，通常还要打个 2.5 折（空间复用紧密度的原因），即 50/4=12.5，也就是不超过 13 个用户可以同时通话。大家都看到了 2.1 节中德国电信对于占用 10MHz 频谱的出价是 7.7 亿美元，如果一个基站竟只能承载这么点用户同时通话，那么想收回成本乃至赚钱简直是不可能的事情。

痛苦归痛苦，问题还是要解决的，话说 GSM 的创始人在这个问题上冥思苦想，却一无所获，正在万般无奈之际就接到了中国老朋友的邀请，让他来中国散散心。问题既然解不出，那么出去散散心也好，或许能有灵感呢。抱着这样的想法，他应邀来到中国做客，并参加了一场盛大的晚会，而晚会上有一幕场景让他眼前一亮，计上心头。那就是——有 8 个歌手在唱同一首歌，而且是一人一句地来！

真不愧是文明古国，就是会利用资源啊！舞台上的一首歌是资源，我 GSM 的一个载波也是资源；把一首歌按时间进行切片，分成 8 份，一人一句地来，就可以让 8 个人都有歌唱，把 GSM 的一个载波按时间进行切片，分成 8 个时隙（time slot），一人占用一个时隙地来，那么就能让 8 个人都有电话打。多么绝妙的主意！

这就是后来 GSM 物理层信道划分的由来，GSM900 频谱上共有 890～915MHz 频宽，按 200kHz 对这段频谱进行等分，分为每个载波用，这就是频分复用（FDM）；然后每个载波又在时间上进行切片，分为 8 个时隙给 8 个用户使用，这就是时分复用（TDM，Time Division Multiplexing）。每当你对时分的概念感觉不够清楚的时候，你就可以想想晚会联唱的场景，如果你对时隙的概念不那么清晰，你就想想那些歌手每人唱一句歌词占用的

时间。

至此，我们已经提出了 3 种增加移动通信系统容量的方法，分别是空分复用（SDM）、频分复用（FDM）和时分复用（TDM）。在 GSM 里面，3 种方式都得到了很好的应用，GSM 也成了全球应用最广泛、最成熟的移动通信系统。但是，总还有人觉得这还不够，于是又提出来了“码分多址”，CDMA（Code Division Multiple Access）。作者觉得，空分、频分、时分的概念都是比较好理解的，独独码分不是那么好让人理解，实现的机制也比较复杂。而 CDMA 是 3 大 3G 标准都绕不过去的核心所在，如果对 CDMA 这个概念理解不够深入，想搞明白 3G 是比较困难的，所以读者在这一块需要花费更多的时间和精力，务必把这个概念弄透彻。为此，尽管 CDMA 的初衷与 SDM、FDM、TDM 一样，都是为了提高系统容量而设计的，但是作者还是认为有必要单独用一小节来讲述 CDMA。

2.2.2 困惑之一（续）：海蒂·拉玛的美丽与高通的魅力

CDMA 的概念源于一个你绝对想不到的人，美丽的电影演员——海蒂·拉玛（见图 2.11）。拉玛 1913 年出生于奥地利的维也纳，我们也许有理由相信，这座音乐之都对拉玛的人生产生了深远的影响，因为她后来提出的跳频，就是源于钢琴演奏！

拉玛对跳频通信的研究最初是因为第二次世界大战。在战场上，当你发射鱼雷的时候，对手通常有办法使它失效——对无线电信号进行干扰，使鱼雷偏离原有目标。因为早期的通信是在一个单独的频道上传输（嗯，你想得很对，就是在我们上一小节所说的频分的那么一小块里进行信号传输），敌方只需简单地探查频道，之后制造足够的电磁噪声来干扰鱼雷引导信号即可。



图 2.11 海蒂·拉玛

拉玛的丈夫曼德尔是个武器制造商，这使得她有兴趣研究规避鱼雷引导信号被干扰的方法，而她后来的合作者安太尔是一个非常著名的作曲家，这给了她以灵感。

拉玛和安太尔关于“免干扰通信系统”的主要原理，用简单的图画和区区百余字描述在了一张小纸片上，其基本想法就是为了避免干扰必须从一个频率跳到另一个频率。而信号的发射者和接收者所采用的频率必须像管弦乐一样达到同步。这张小纸片因为首次提出了“跳频”的概念而成为不朽。1942 年 8 月 11 日，安太尔和拉玛的研究被授予美国专利“2292387 号”，名称为“秘密通信系统”。

跳频后来又演化成了扩频通信，并成为高通公司 CDMA 技术的基础，而高通公司也凭借 CDMA 成为通信业界一颗耀眼的明星。“一流的公司做标准”就是对高通的最



佳阐释。

在这里，我们有必要区分一下跳频和扩频的概念。

跳频通常是一种序列方式，信息在一段时间内（即间隔时间内）在一个频率上传输，然后又跳到另一个频率。扩频技术由跳频的概念发展而来，但它更先进。在扩频通信中，信息能在多个频道上同时发送。

打个比较粗浅的比喻，跳频就好比按一定的顺序比如说“哆，来，咪，发，梭，拉，西”敲击钢琴键盘。由于钢琴键盘每个音符的频率都是不相同的，所以这种周而复始的音符变动其实也可以理解为频率的变动，海蒂·拉玛或许就是从这一点上领悟到“跳频”的真谛的吧。当然，这个敲击序列不会像“1234567”那么有规律，一定是看起来混乱但是收发双方都知道运行规律的，要不然也就起不到保密的效果了。你可以把那个“看似混乱但收发双方都知道的序列”理解为一首歌的五线谱，信号的发射方和接收方都可以根据这个五线谱了解到接下来的音符会是哪个，“也即跳到哪个频道进行通信”。

而扩频像什么呢？咳咳，就好比你伸出两个巴掌，同时敲击所有的音符键，在所有的频道上同时传送信号。这个比方倒是形象了，但是从这个例子里不好解释这么做有啥好处，别急，我们接下来就会介绍到。

假设现在有 5MHz 频段，GSM 会怎样分配给用户呢。如图 2.12 所示。

		时分							
		时隙 1	时隙 2	时隙 3	时隙 4	时隙 5	时隙 6	时隙 7	时隙 8
频分	频点 1	用户 1	用户 2	用户 3	用户 4	用户 5	用户 6	用户 7	用户 8
	频点 2	用户 9	用户 10	用户 11	用户 12	用户 13	用户 14	用户 15	用户 16
	频点 3								
	频点 4								
	频点 5								
	频点 6								
	频点 7								
	频点 8								
	⋮								
	频点 25								用户 *N*

图 2.12　GSM 的复用方法

GSM 是一个典型的频分以及时分的复用方法，符合大家的传统认知。而到了 WCDMA，则出现了这样不可思议的一幕，如图 2.13 所示。



		5MHz 频宽
码分	扩频码 1	用户 1
	扩频码 2	用户 2
	扩频码 3	用户 3
	扩频码 4	用户 4
	扩频码 5	用户 5
	扩频码 6	用户 6
	扩频码 7	用户 7
	扩频码 8	用户 8
	⋮	……
	扩频码 N	用户 N

图 2.13　WCDMA 的复用方法

我们看到，在这 5MHz 的频宽内，频分的概念消失了，时分的概念也消失了。所有用户都要占用 5MHz 频宽，我们知道，不同的信号由相同频率的电磁波传播是会相互产生干扰的，就好比不同的人说话所产生的声波因为承载在相同的频率上（20～3 400Hz）会互相产生干扰一样，那我们像图 2.13 这样做行得通吗？接收端的所有用户都工作在这 5MHz 的频段上，这些用户不论是从时间上来看也好，从频率上来看也罢都是一样的，那它们靠什么来进行区分呢？答案是：靠码字！

这个答案是如此令人费解，以至于高通在创始 CDMA 的时候不得不特意描绘了一个场景以供大家理解，那就是著名的“鸡尾酒模型”。

高通把各种无线技术比喻为在一个大厦中的聚会。

如果聚会上的交流基于 FDMA 技术，每个一对一的谈话都将在独立的房间内举行，这个房间就代表了分配给你的频段。你和你的朋友在房间内谈话，彼此可以互相清晰地听见对方谈话，既然房间里只有你们两人，那么声音大一点也无所谓（对于 GSM 这样的 FDMA、TDMA 系统，功率控制远没有 CDMA 系统重要）。假如一个大厦只有 20 个房间，那么一次就只能有 20 场会谈，假如有几百人来赴宴，其他人就要意兴阑珊地离开了。

为了解决这个缺陷，用 TDMA 技术来补充是个不错的选择。同样几百人的宴会，每对客人可以进入房间进行一对一的会谈，但是不能谈太久就得让给下对客人，比如说 30s 后就将房间让出来，这样通过依次轮替的方法可以让更多的人有交谈的机会，从而提高了容量。

而 CDMA 更像是鸡尾酒宴会，大家可以在一个大房间里进行交谈。既然都是在一个屋子里，如果都是用中文说话，那麻烦就大了，你会不断地被与你无关的人说的话所干扰，甚至搞得你无法和你想交流的对象进行正常的交流。这时候如果大家所采用的编码



方式不同，比如你用中文，张三用英语，李四用意大利语，王五用西班牙语，情况就会好得多。你的对家用中文作为“扩频码”和你说话，尽管背景噪声很嘈杂，但是你还是可以很好地分辨出他的声音，OK，咱可以正常交流。这时候张三说的英语的声波过来干扰了，怎么办呢，这时候你的大脑就相当于处理机，它就会这么反应：“对不起，哥们，英语咱一窍不通，您的扩频码咱不认识，咱只当是背景噪声直接过滤了。”

请注意，扩频码有一个特点，那就是必须正交。正交在数学里的概念就是完完全全不相关，也即两个信号的乘积在某个区间内积分为零。换句话说，就是你这编码和编码之间要没啥相关性，英语和汉语就适合做扩频码，因为英语和汉语没啥相关性，很容易就可以区分开来（其实这句话并不完全正确，汉语里有很多舶来品，比如沙发——sofa，好莱坞——Hollywood）。但是湖北话和湖南话做扩频码就不合适了，重叠部分太多了，一起说会干扰得一塌糊涂。

说到这里，相信大家也明白扩频码大致是怎么回事了。但是估计很快就有人会有疑问，在“鸡尾酒宴会”中，要找到两两正交的扩频码是很简单的事情，英语和汉语、韩语与日语，差别都非常大，几乎可以理解为完全没有什么相关性。而我们机器所使用的都是“0”和“1”（按习惯分别用电平值“+1”和“−1”表示），你果真能找到那么多没有交集、完全不相关的序列吗？

在这里，我们得首先搞清楚对于两个序列，什么叫做不相关，定义很简单，两个序列乘的结果加起来等于 0 就叫做不相关。比如说{+1,−1}和{+1,+1}两个序列，相乘的结果就是 $1 \times 1+1 \times (-1)=0$，等于 0 就说明你们俩没关系，不来电，换成数学的话来说就叫做不相关。

我们很容易就能推出一大堆这样的序列，比如{+1,+1,+1,+1}和{+1,+1, −1,−1}，乃至可以按图 2.14 所示的码树一直推演下去。大家不难得出，每个纵列的码序列相乘的结果都是 0，也就是说是完全不相关的。我们可以把每个序列当成一门语言，序列和序列之间是相互正交的，就好比语言和语言之间是正交的一样。那么只要把原始数据用这个序列来编码，就可以让不同人的原始数据进行正交。我们把用这个序列来对原始数据进行编码的过程叫做**扩频**，而这个序列就叫做**扩频码**。

3 大 3G 标准的扩频码都产自 Walsh 序列，图 2.14 就是 Walsh 序列生成的一种简单的演示。在 cdma2000 中，扩频码也称为 Walsh 码，而在 WCDMA 和 TD-SCDMA 中则称为 OVSF（Orthogonal Variable Spreading Factor，正交可变扩频因子）码，其实两者来源都一样，只是生成方式略有不同而已。

其实到这里，我们只是说明了存在这样一系列的序列，它们之间就像英语和中文一样，没有什么相关性，那么不同的用户采用不同的序列来编码，就可以互相不干扰。跟“扩频”两个字好像没有关系，一个“扩”字，一个“频”字，在本节中暂时还没有看到。另外，对于一个原始的话音信号，到底是怎样和这些序列进行运算，从而能实现和其他



用户的话音信号互不干扰的过程，也没有举例，没有举例的话，大家的印象也就不可能很深刻。别急，以上两个问题，我们马上就要讲到。

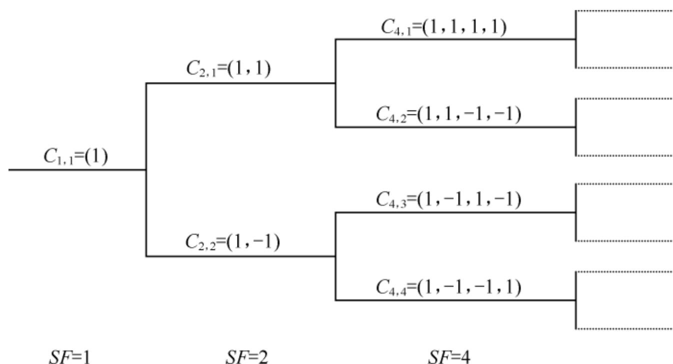


图 2.14　扩频码的生成

所谓“扩频”，就是让话音信号序列和比它速率高得多的扩频序列相乘，从而延展它的频带。我们举一个例子来说明这个问题。假设我原来的话音信号是“10”，那么它和一串“1101100110100011”的码在发送端手机进行扩频，然后在接收端手机进行解扩，这个过程是怎样的？在这里说明一下，图 2.15 中的运算是模二加运算。

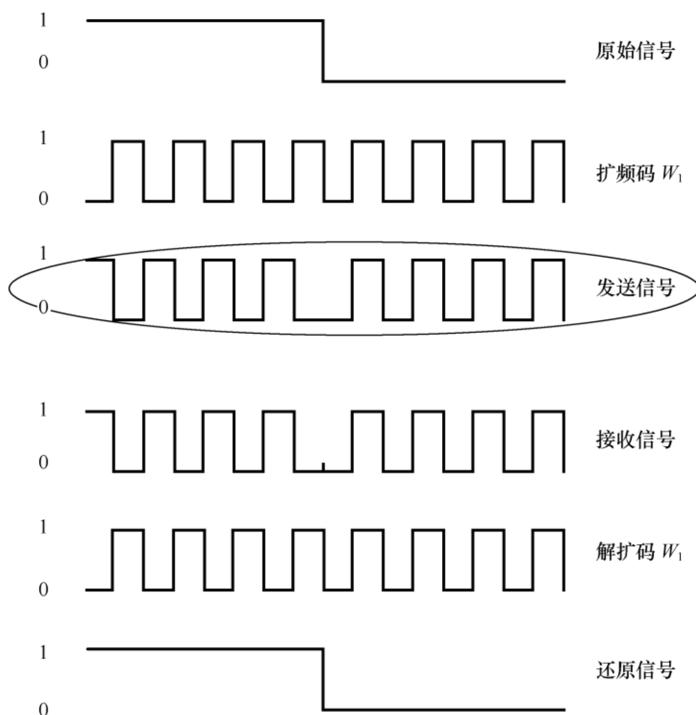


图 2.15　扩频与解扩的过程



图 2.15 很好地说明了一个信号从发送端扩频到接收端解扩还原信号的过程，假设原始话音信号速率是 R，那么它扩频后的速率就达到了 $8R$，也就是频率是原来的 8 倍，这个就叫做“扩频”。扩频完成了，信号也开始在空中发送了，然而一个基站下是不止一个手机的，手机 1 的信号跑去干扰手机 2 是很正常的，如图 2.16 所示。由于手机 1 和手机 2 使用的频率是完全相同的，如果扩频码不能有效区分两个信号，那么同频干扰的威力是十分可怕的。

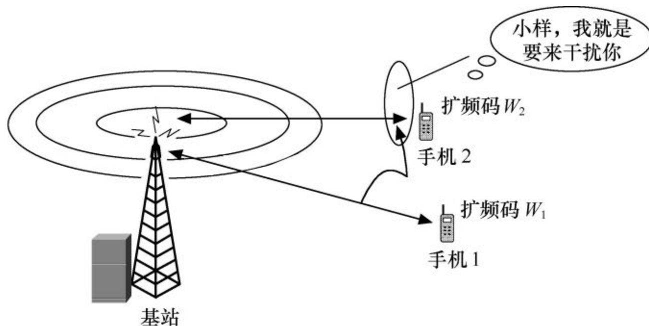


图 2.16　手机 1 的信号去干扰手机 2

我们在上面把不同的扩频码比喻成不同的语言，信誓旦旦说它们是不会互相干扰的，是不是真的是这样，有待我们来验证。我们把图 2.15 中接收端的解扩码换成 W_2，发送信号还是用图 2.15 所示圆圈中的那个发送信号，这样就变成了手机 2 接收了基站发给手机 1 的信号，看看手机 2 是怎样把它过滤掉的，如图 2.17 所示。

从图 2.17 中看好像干扰还没有消掉，形成了一串“1100110000110011”的序列，其实这种理解有误。解扩之后，信号又变成了低频信号，只应该有两个码元，同一个码元内高低电平的变化会进行积分，积分的值才是最终的值。在第一个周期内，图 2.17 所示的为“11001100”，换算成高低电平也就是“−1，−1，+1，+1，−1，−1，+1，+1”，把这 8 个值加起来等于多少？0！也就是说，其他手机发过来的信号，由于扩频码正交的特性，都可以过滤掉。

上述就是 CDMA 的工作原理。用扩频码对原来的低频信号进行扩频，使之在整个频段上工作，由于扩频码的正交性，不同的用户可以用不同的扩频码来进行区分，这就是 CDMA（Code Division Multiple Access，码分多址）这个词的来历。

看到这里，相信读者已经能够理解如何通过扩频码来区分不同的用户，从而使他们能在同一频段上进行工作了。也发现了，要搞清楚 CDMA 远比弄懂 FDMA 和 TDMA 复杂，所以高通公司在最初推广 CDMA 概念的时候，也是困难重重。

到这里我们心里一定还存在疑问，那就是这样扩频究竟有什么好处？我们为什么要这样做？CDMA 技术晚于 GSM 成型，最终却杀出一条血路，并成为 3 大 3G 标准的基

础，一定是有它的道理之所在，对于这个问题的答案我们放到第 4 章中进行探讨。

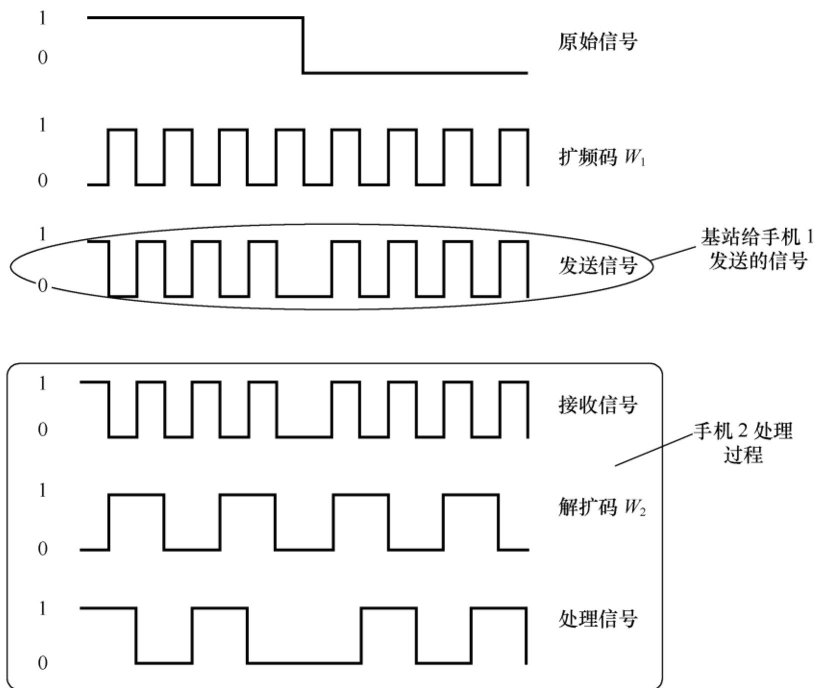


图 2.17　手机 2 处理干扰的过程

应当说 2.2.1 小节和 2.2.2 小节是全书最重要的内容，无线通信之所以复杂，就在于它空中的频谱资源非常有限。而基站下是不止一个手机的，所以要通过 FDMA、TDMA、CDMA 来解决如何将有限的频谱资源合理分配给手机的问题。这个大原则定下来了，一个无线通信系统的大框架就定下来了，剩下的问题就是如何来完善这个框架，这就是我们在本章中接下来要进行的工作。

2.2.3　困惑之二：无线环境和手机远近在不断变化

基站老兄刚刚通过各种复用方式解决了多个手机资源分配的问题，很快它又发现，这帮手机一点也没有固话省心。它们离自己的距离，不像固话离接入点是固定的，而是随着人的走动一会近一会远。不仅如此，无线环境也在不断变化，由于小尺度衰落效应，手机挪动十几厘米（相对于 900MHz 的电磁波而言就是半个波长）信号可能突然差 8～9dB。

这会带来什么问题呢？由于距离在变化、无线环境也在变化，如图 2.18 所示，基站不确定自己该用多大的嗓门和手机说话了！



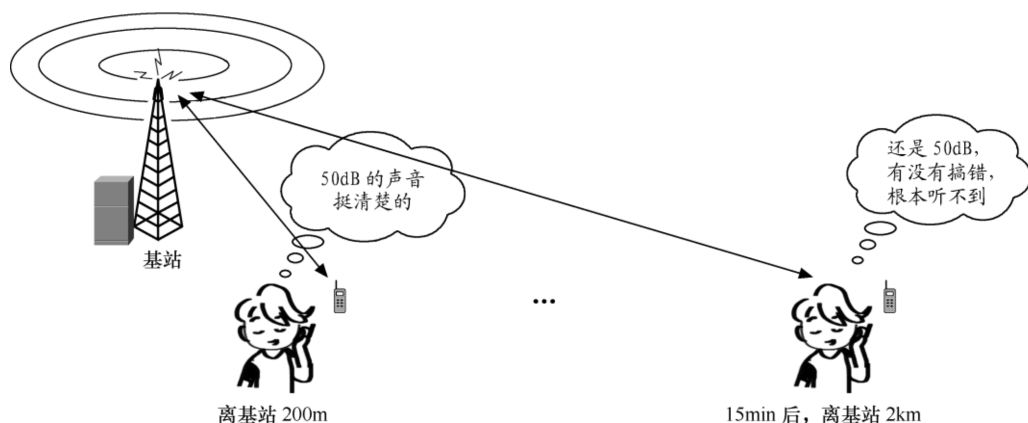


图 2.18　多大的嗓门，这是个问题

实际上，这算不上是个多大的问题。我们在生活中有类似的处理经验，打电话的时候，如果对方声音太小导致你听不清楚了，你会说“请你大声一点说话！”如果对方声音太大，震得你耳膜嗡嗡作响，你会要求“麻烦你小声一点，耳朵都要震聋了”。

基站和手机之间的处理方式也跟这基本一致，不过它们衡量的标准不是耳膜的感受，而是 SIR（Signal to Interference Ratio，信号和噪声的比值）。手机和基站都会有自己的 *SIR* 标准，如果低于这个值，那么就会要求对方提高功率；如果高于这个值，就会要求对方降低功率，如图 2.19 所示。

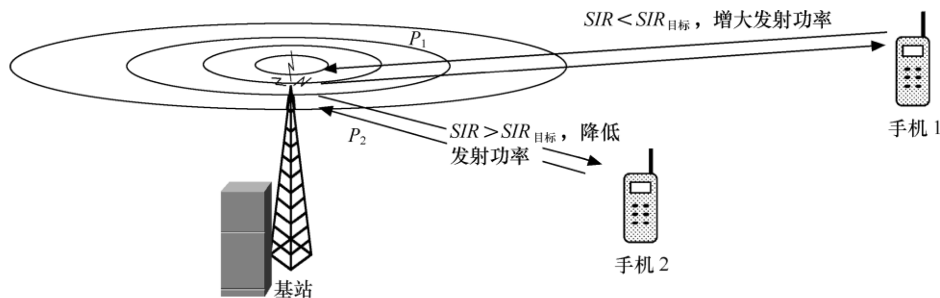


图 2.19　嗓门该多大，由 *SIR* 控制

值得注意的是，这个功率控制的过程是双向的，手机希望基站给它发射信号的时候，功率不要太大或太小；基站也希望手机给它发射信号的时候，功率不要太大或太小。这其实跟两个人打电话是一样的，两个人通话的时候，双方都会反馈你的声音是大了还是小了，希望你接下来把音量提高还是降低。

上面说的是一个控制功率的方法问题，接下来要说的是一个控制频度的问题。也就是在一秒钟时间里，基站或是手机根据反馈信息调整几次发射功率的问题。在 GSM 里

面，这个频度是 2 次/s；在 WCDMA 中，频度为 1 500 次/s；在 TD-SCDMA 中，频度为 200 次/s；在 cdma2000 中，频度为 800 次/s。这些次数均与几种制式的帧结构有关，大家在深入学习的时候可以认真进行对比，就不在这里展开了。值得一提的是，比较快的功率调整频率有利于克服小尺度衰落，因为小尺度衰落变化的频率也是非常快的。

2.2.4 困惑之三：减少噪声，降低能耗

我们在 2.2.3 小节中看到，为了避免信号强度太低而被噪声湮没，基站和终端都会根据反馈的信噪比（*SIR*）来调高发射功率。但与此同时，如果 *SIR* 指标过好，也会通过功率控制来调低发射功率，这又是为什么呢？发射功率越大，我听的不是越清楚么，为什么要去降低发射功率呢？

那是因为，基站下不止一个手机！就好比一个宴会大厅不止一个人一样，你说话的声音大了，必然多多少少会干扰到别人。所以，我们对信噪比的要求，也是“适可而止”而已。除了控制发射功率以外，设计者们还想出了别的办法来降低系统的噪声，那就是“不连续发射”。所谓不连续发射，就是该你发言的时候你就发言，不该你发言的时候你就闭嘴，这样整个世界能清净很多。

由于手机的通话是双向的，经统计，某个用户拿手机打电话的时候，平均的说话时间约在 40%以下。通常情况下，话音经过信源编码后的速率是 12.2kbit/s 或者 13kbit/s。你说话的那 40%的时间，这个比特流量当然是不能少的；当你不说话的那 60%的时间，还以这个速率进行传输那就很令人郁闷了，因为不说话的时候传递的比特信息流对通话双方而言没有任何意义，还会对无线网络造成干扰。那么不说话的时候我们能不能一个比特也不发送？实际上这样也是不行的，为什么呢？

因为打电话的时候你是看不到对方的，如果有 60%的时间你从对方那里听不到任何声音，你就会怀疑你的电话是不是已经掉线了。对于一个商用无线通信系统，肯定不希望为了减少手机对系统的干扰就让客户频繁产生掉话的错觉。于是，就采用了话音激活检测（VAD，Voice Activity Detection）技术，由编码器来检测是否有声音发出。如果没有声音发出，那么就发送 500bit/s 的低速编码，这种低速编码通常被称为“舒适噪声”编码，由接收端的解码器产生舒适噪声，以避免对端的用户误以为通信已中断。

在通话的时候采取高速率的话音编码，在通话的间隙传输 500bit/s 的低速舒适噪声编码，这就被称作 DTX（Discontinuous Transimission，不连续发射）技术。

除了通过功控和不连续发射技术降低整个无线通信系统的噪声和干扰以外，我们还得想办法降低终端的功耗。在设计 GSM 和 WCDMA 的时候，节能减排这个话题还不像今天一样热门，降低终端功耗的目的是为了让它有更长时间的待机时间。毕竟，我们的



梦想是“任何时间”都可以通话，如果一个手机老是没电关机那可不妙。

通常而言，想节省打电话和上网的电量是比较困难的。手机节省电量的秘密，就在“待机”这两个字上。“待机”的时候，并不是什么事情都不做的，手机需要监听一种叫做“寻呼”的消息。

寻呼的具体内容我们会在 2.3.2 小节中具体介绍，在这里，先讲一讲大致的概念。在大学的课堂里，大家估计都有一种体验，这种体验叫做“点到”。一个大课堂或许有 180 个人，老师翻着花名册唾沫横飞地念着这个或是那个的名字，虽然每念一次都只有 1/180 的概率命中你，但是你还是不得不竖起耳朵听着每一个名字，因为万一点到你而你没有答到，那么下场可能就是期末考试被扣分。对于手机而言，其实也有类似的过程，叫做“寻呼”。既然是一个“任何时间”都能通话的手机，那么就意味着你任何时间都可能被呼叫到。如果有用户呼叫你，无线网络显然需要发送信息来找你，发送的信息就叫做“寻呼消息”。而基站下发找你的消息就如同老师点名一样，是不区分对象混在一起的“广播”，如果没有合适的手段来规避的话，那就意味着手机时时刻刻要监听基站的寻呼信息。

关键问题就来了，难道你竖起耳朵监听老师点名的过程，不需要消耗能量吗？

答案是毋庸置疑的，但你肯定是不会注意到的，以你八九十或者上百斤的肌肉加脂肪还有水的能量储备，这点热量消耗算得了什么！但是对于电池就不一样了，它就那么点大小，每一点能量对于它都是很珍贵的，都是需要花在刀刃上的。对于寻呼这种事情，能省一点能量就省一点。毕竟基站的寻呼信息和课堂点名还不一样，它是 365 天 × 24 小时不间断寻呼，如果要你一年 365 天一刻不停地竖着耳朵听老师点名，我想你也会累得半死。

手机监听寻呼消息的策略叫做 DRX（Discontinuous Reception，不连续接收）。其实这种策略在大学课堂里也用到了，比如说还是 180 个人，但是这 180 个人来自 6 个班。那么老师一般也比较善解人意，不会天马行空毫无规律地点名，而是会一个班一个班地念。这样，你只需要在念到你们班的时候竖起耳朵听即可，其余时间，你大可趴在桌子上休息。这样，你听点名消耗的体力就只有原来的 1/6。

对于一个无线通信系统，一般是用 IMSI 号（International Mobile Subscriber Identification Number，国际移动用户识别码）来进行分组，IMSI 号对于每个用户而言都是唯一的，而且是可以用来识别一个用户的，就好比我们的身份证。你可以把尾数为 1 的用户分为 1 组，尾数为 2 的用户分为 1 组……这样就可以分为 10 组，每组的用户只在轮到寻呼自己组的时候才上去监听寻呼消息，那么在这上面消耗的电能就只有原来的 1/10。你甚至可以拿 IMSI 号除以 72，余数相同的为一组，这样就有 72 组，节省的电能就更多了。具体分为多少组取决于寻呼子信道的数量，在这里不展开讨论。

2.2.5 困惑之四：北京时间的价值

在生活中，我们需要一个统一的时间源，我们经常需要将自己的手表和北京时间进行核对。如果手表走快或者走慢半个小时，或许就会有很多麻烦，比如赶不上飞机、挤不上火车、上班要迟到。

在基站和手机的世界里，有一个统一的时间源则更重要。因为它们传输的是“10010011”的比特流，如果时间没校准好，该出现 0 的位置出现了 1，该出现 1 的位置出现了 0，意思就完全变了。在生活中我们用“××时××分××秒”来表述具体的某个时间点，在基站的世界里，它不想搞得这么复杂，它只用 SFN（System Frame Number，系统帧号）来表示具体的时间。我们可以通过 SFN 的差值来辨别两个消息相距多少时间，比如消息 1 承载在 2 046 号 SFN 帧上，消息 2 承载在 4 096 号 SFN 帧上，那么它们相差的时间就是 2 050 个帧。在基站和手机的世界里，它们就是这样来度量时间的。

如果你觉得相差 2 050 个帧这个时间刻度看起来让你很犯晕，想把它换算成人类日常生活用的时间，那也没有问题。你只需要弄清楚这 2 050 个帧是属于哪个通信系统的，就可以搞清楚它换算成秒以后到底是多长时间，因为不同的无线通信系统设计的帧长是不同的。比如 GSM 系统，一个帧的时间是 4.615ms；而在 WCDMA 和 TD-SCDMA 中，一个帧的时间是 10ms。那么在 GSM 系统中，2 050 个帧的时间就是 2 050 × 4.615ms= 9 460.75ms，也就是 9.46s；而在 WCDMA 和 TD-SCDMA 中，2 050 个帧的时间就是 2 050 × 10ms = 20 500ms，也就是 20.5s。

值得注意的是，空中接口的计时并不像我们日常生活中的计时一样，可以从伏羲创立八卦一直计到未来的未来。空中接口是采用循环计时的，比如 WCDMA 的 SFN 帧，就是从 0～4 096，周而复始。因为 SFN 的帧号是要不断在空中广播的，采用循环计时的话一来可以使 SFN 帧的长度固定，二来帧号比较短也可以节约不少资源。再说基站是不需要记住很久之前发生过什么事情的，所以用比较短的循环计时也就完全够了。

我们刚才说的是一个无线通信系统如何确定计时标准和方法的问题。接下来要说到的是基站和手机如何来校对时间的问题，这个校对时间的过程叫做“同步”。日常生活中这个“同步”的过程是比较简单的，“打开电视锁定一个频道”—“收看新闻联播前的准点报时”—“校准时间”。手机也有类似的过程，那就是“监听导频信息”—“锁定同步信道”—“读取 SFN 来校准时间”。

一个真正的无线通信系统实现同步的过程比上述还要复杂，因为电磁波虽然是以光速传播的，但其实光速传播还是有时延的。传播路径的变化会造成到达接收机上的时间产生微小的变化，而这微小的变化对以兆赫兹运行的通信系统而言，是能造成不少麻烦



的。想了解这方面的读者可以参考“时间提前量”、“时域均衡”、“Rake 接收机”等相关内容。

到这小节为止，我们在 2.2 节中一共讲述了多址技术、功率控制、DTX 与 DRX、基站与手机的时间同步等几方面的内容。在 2.1 节中，我们解决的是点对点级别的无线通信的问题，也就是讲述两个电台之间如何实现通信；在 2.2 节中，我们解决的是点对多点级别的无线通信的问题，也就是讲述基站和多个手机如何有效利用频谱资源进行通信的内容。但是大家应该知道，因为要提升一个无线通信系统的容量，我们采用了空分复用，也就是说，世界上不止一个基站，而是有很多个基站！这些基站之间怎么配合呢，这就是 2.3 节中要讲述的内容。

2.3 大哥大与模拟通信网— 多点对多点的无线通信

到这一节里，我们就要开始讨论一个完整的移动通信网的全貌了。概括地说，从点对多点的基站与手机的通信到多点对多点的移动通信网，有以下几个问题需要解决。

（1）现在世界上不止一个基站了，手机怎样判断它现在位于哪个基站下？如何才能知道基站的相关信息？

（2）我们要实现的是“任何时间”、“任何地点”的通信，而手机的位置在一直不停地变化，有电话要找你的时候，怎么才能知道你在哪里，然后找到你呢？

（3）在通话的过程中，你可能从一个基站的覆盖范围走到了另一个基站的覆盖范围，怎样才能保持通话，不至于中断？

（4）既然是一个成熟的商用通信系统，那么系统的安全性显然非常重要，没有谁愿意自己的号码被盗用，也没有谁愿意通话的时候被人窃听。

以上 4 个问题分别对应移动通信网里的“广播”、“寻呼”、“切换”、“鉴权与加密”4 个非常重要的概念。这些概念无论是对于 GSM、WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000，还是 LTE 都是适用的，也是构成移动通信网最基本的元素。接下来我们就来看看这几个方面具体是怎么实现的。

2.3.1 困惑一：手机不知道它在哪个基站下面

把一个手机扔到移动通信网里，手机是很懵懂的。如图 2.20 所示，它并不知道自己处于哪个基站的覆盖下，也不知道这个基站有哪些特点（小区参数、全网参数）。手机上既没有装雷达，也没有一双慧眼，要找到基站并和基站建立联系，全靠基站主动“**广播**”消息给它。

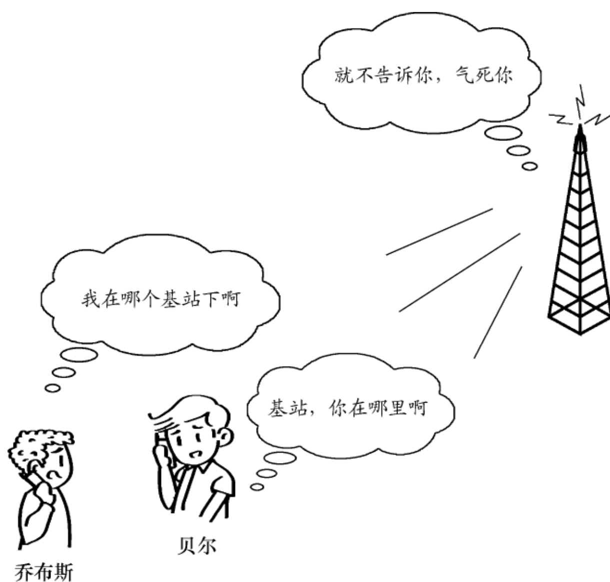


图 2.20　手机需要找到基站才能连上移动通信网

1. 手机如何发现基站

要听到基站的广播信息，从而完成接入网络的一系列动作，手机必须先得找到具体某一个基站的信号。那么手机到底如何找到基站呢？说起来与旅游团差不多，在一些非常热门的旅游景点，游客非常多，旅游团走散是再正常不过了，要靠你去找团可能有点困难。每当这时，导游总是站在高处，挥舞手中的小黄旗，用大喇叭广播着："××地市的朋友注意了，俺在这里，俺在这里"。

基站的处理方式与此颇为类似，它总是一刻不停地向外广播信息，以方便手机找到它。然而手机又如何才能听到基站的广播信息，从而去锁定基站呢？

对于 GSM 系统而言，不同的基站广播信息时所使用的频率不同，这样 GSM 手机必须扫描整个频段，按信号的强度从最强信号开始逐一检查，直到找到合适的基站的广播信息。这有点像我们在学校里听广播，我们拿着收音机调啊调，调到一个信号最强的台然后收听广播。不过咱们是手动挡，人家手机是自动挡。

CDMA 手机锁定基站的方式要简单得多。在 CDMA 系统里，基站固定使用一个频率广播信息，手机只要调谐到这个频率，就可以收到基站的指引信息，从而找到基站。系统的控制载频在整个 CDMA 通信网络中是统一的，这有点儿像无论在哪里，只要拨打 110 就可以得到警察的帮助一样，手机只要记住控制载频这个频率，接下来的事情就好办了。



2. 广播的内容

话说基站是通过广播指引信息让手机找到基站，那么基站都广播一些什么内容呢？

对于 GSM 系统而言，由于手机需要调整接收频率以正确接收广播信息，那么首先需要广播频率校正信号。而又因为 GSM 是一个时分复用系统，时间的同步也很重要，那么接下来的信息就是同步信号。

当然还会有一些其他信息，比如基站的标识、空中接口的结构参数（比如这个基站都使用了哪些频率、属于哪个位置区、手机选择该小区的优先级等）。这很好理解，就好比旅行团的导游会介绍一下当地有哪些景色、游完要花多少时间、需要多少花费等一些详细信息。你觉得合适就跟团，觉得不合适再听其他团的介绍换团也可以（根据小区的各项信息，如果当前小区不适合停留，则换到别的小区去）。

CDMA 系统与 GSM 系统类似，首先是广播导频信号和同步信号，然后再广播基站的标识和空中接口的结构参数。

3. 广播之间避免干扰

由以上内容可知，广播信息不但能帮助手机找到和锁定基站，还能为手机提供大量当前小区所必需的信息。因此我们希望广播之间不要互相干扰，不然会带来很多麻烦。

GSM 相邻的基站和小区采取不同的频率进行广播，工作的频率不同，自然不会产生干扰。就好比两个人唱歌，一个唱男低音，一个唱花腔女高音，谁也干扰不着谁。

CDMA 系统中采用的是一个固定的频率，但是扰码不一样，也不会产生干扰。就好比一堆导游，一个说中文，一个说英文，一个说意大利语，谁也干扰不着谁。

请注意了，我们这里谈到的基站之间广播信息的互相干扰和 2.2.1 小节及 2.2.2 小节中谈到的干扰还不一样。2.2.1 小节和 2.2.2 小节中谈到的是如何避免同一个基站下的手机上下行信号互相干扰。这里谈到的是如何避免相邻基站之间广播信息的干扰，出发点不一样，处理方式也有差异。

2.3.2　困惑二：网络不知道手机的位置

对于固定通信而言，它知道自己的用户在哪里，因为用户的位置是固定的；而对于移动通信而言，则完全不是这么回事。手机始终处于移动状态，由于基站的覆盖范围有限，因此必然出现手机从一个基站的覆盖范围移动到另一个基站覆盖范围的情况。

尽管如此，移动网却必须想办法找到手机，要不然就无法实现和该手机的联系，那它怎样才能找到手机呢？

一个简单的办法是通过所有的基站下发“寻人启事”，寻找该手机，这样的办法很有

效，只要手机还在移动通信网的覆盖范围内，那么就一定可以找到，如图 2.21 所示。

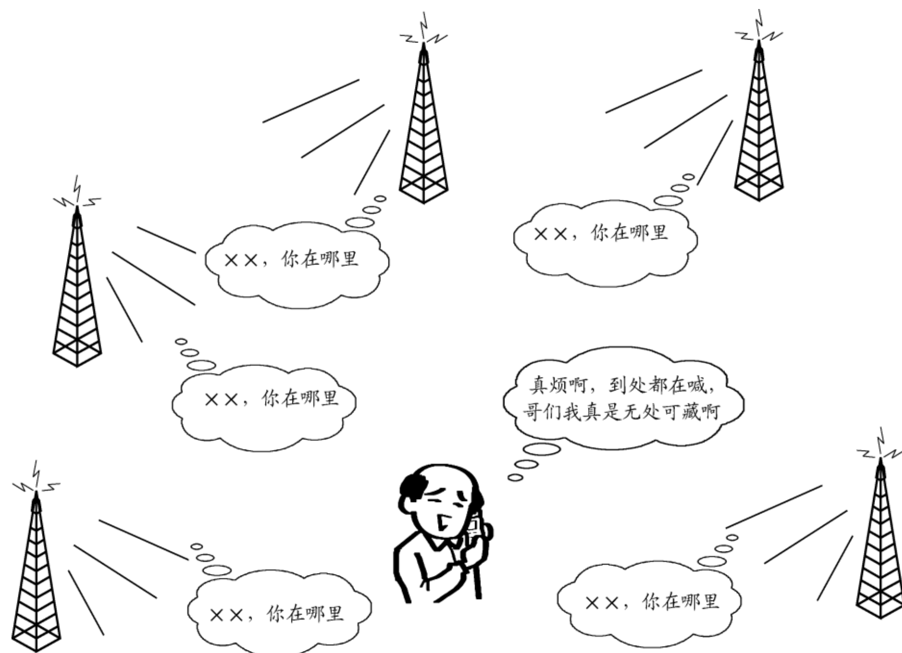


图 2.21　对手机进行全网寻找

办法虽然简单快捷，但是弊端也是显而易见的，要找一部手机居然要进行全程全网的寻找，太没效率了，我们得想想办法。想当年没有移动网的时候，我们到一个地方游玩总是用固定电话给家里打一个电话报平安："老妈，俺在长沙开福区玩哦"，"老妈，我在北京丰台区玩哦"。万一俺当年不幸走丢了（呸，啥子假设嘛），家里人也只需要在俺走丢的区域打"寻人启事"的广告，不用在整个长沙市或者北京市打广告，这样就可以大大节省一笔广告费。

现代的无线通信系统在处理如何寻找手机这个问题上和以上方式有惊人的类似。它先是将一个城市的无线网络划成若干个位置区（类似城市的片区划分，如长沙市的开福区、岳麓区等），并分位置区广播自己的位置区消息，如图 2.22 所示。手机通过侦听广播信息得知自己所在的位置区，如果发现自己的位置区发生了变化，则主动联系无线网络，上报自己所在的位置（类似于到了新的地方后向家里报平安，告知自己所在的位置），如图 2.23 所示。

无线网络收到手机发来的位置变更消息后，就把它记载在数据库里，这个数据库称为位置寄存器。等以后无线网络收到对该手机的被叫请求后，就首先查找位置寄存器，确定手机当前所处的位置区，再将被叫的请求发送到该位置区的所有基站，由这些基站



对手机进行寻呼。

图 2.22　网络通过广播告知手机自己所处的位置区

位置变更消息还有一个时效性的问题。有时候你手机所处的位置区并没有变更，但网络也无法找到你，比如你的手机电池没电了，或是 SIM 卡被拔出来了。还有一种可能是你的手机位置发生了变化，但是网络无法得知，比如说你进入了无网络覆盖的区域。在这种情况下，继续对你寻呼无疑是浪费了网络的资源。为了避免造成浪费，我们通常设定一个周期性的时间，要求手机每隔一定时间，不管位置区有没有变化，都要向网络汇报一下自己当前所在的位置区，如图 2.24 所示。对于逾时未报的，就把它当作“网络不可及”好了，直到收到它的下一次位置更新再改变状态。

位置区的划分需要寻找一个平衡。划得太大了浪费寻呼资源，划得太小了手机走不多远就要上报位置区变更，同样浪费系统资源。

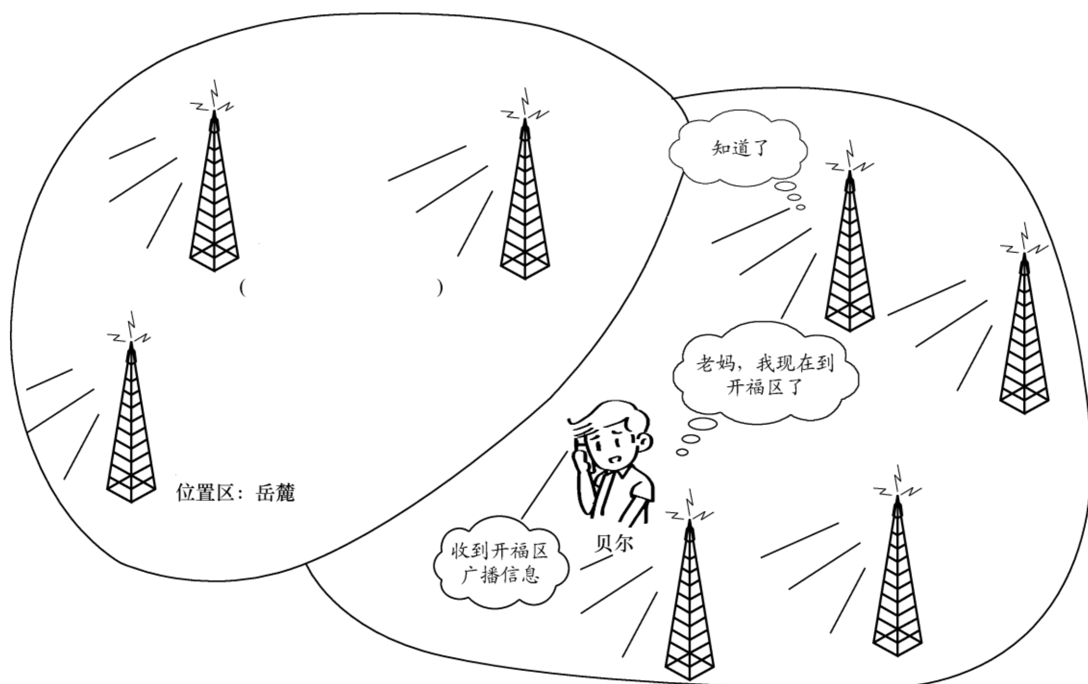


图 2.23　位置区变更以后，主动向网络汇报自己的新位置

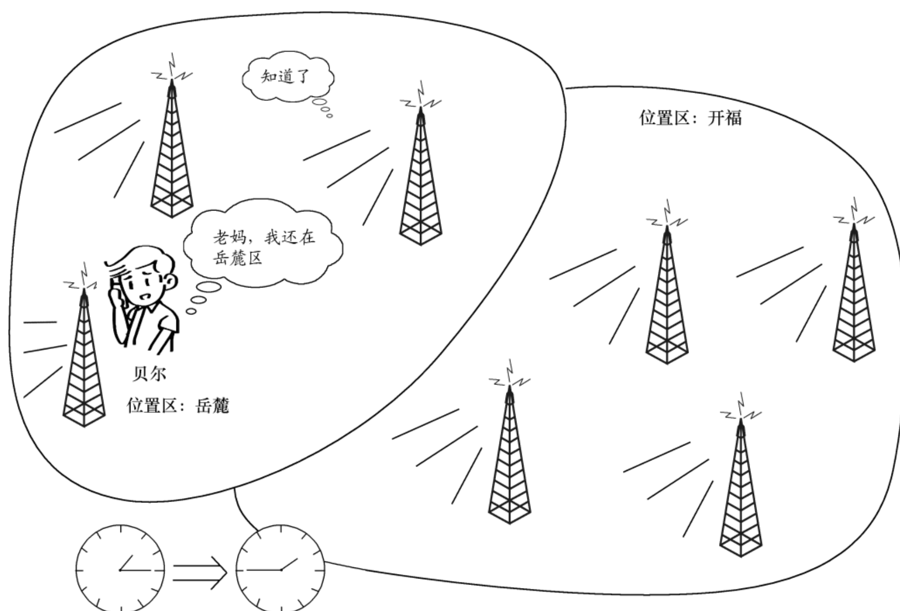


图 2.24　周期性更新（图示为 30min 后）



2.3.3　困惑三：如何保证“移动”着打电话不会有中断

我们现在考虑的模型相对 2.2 节要更复杂，现在有了多个基站。用户打电话的时候总会从一个基站覆盖的范围转移到另一个基站的覆盖范围，那么用户与一个基站的通信也不可避免地要转到另一个基站上去，这就是“Handover”——切换。切换是移动通信系统成功的关键，如果没有切换这样一个流程，每个基站各扫门前雪，不管从其他基站下过来的手机还在进行中的通话，那么结果一定是掉话很频繁，用户很生气。

Handover 这个英语词汇非常形象，很有助于阐述“切换”的本质。它的原意是移交。基站甲对基站乙说：“iPhone 这个小兄弟就要脱离我的地盘到你的地盘了，我把它移交给你了，麻烦你好好照顾它”，如图 2.25 所示。

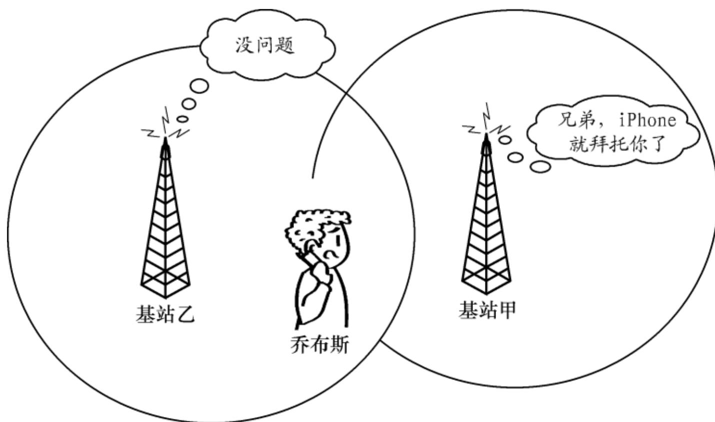


图 2.25　切换示意图

切换的方式有很多种，一种是终端首先切断与原来基站的联系，然后再接入新的基站，这种切换称之为“硬切换”，在切换的过程中通信会发生瞬时的中断。与此相对应，若终端和相邻的两个基站同时保持联系，当终端彻底进入某一个基站的覆盖区域后，才断开与另一个基站的联系，切换期间没有中断通话，称之为“软切换”或者“无缝切换”。

我们也可以拿固定电话来打个比方。固话在墙上的接口就好比无线通信的空中接口，电话都是通过接口和网络保持联系。“硬切换”就是这个固话只有一个接口和一条电话线，当你要移动到另一个房间（可以理解为另一个基站的覆盖范围），那么你就把电话线从这个房间的墙上的插口中拔出来，再插到另一个房间的插口中去，“先拔后连”，称之为硬切换。呵呵，你的固话如果要“切换”，估计也就只有这种“硬切换”法了。

对于“软切换”，我们一时间难以有清晰的理解，因为软切换的本质是这个手机同时有几个基站在与其保持通信，断了一个没关系，其他基站还在继续。这样的类似场景在日常生活中比较难以找到，从而提高了我们理解它的难度。不妨还是以固话为例，打这

样一个有点夸张的比方。假设我们的固定电话在电话机上有两个插口，上面可以连两条电话线，在一个房间里其中一根电话线插到墙上的插口通话时，另一根电话线还可以插到隔壁的插口上实现通信，我们的两根电话线都可以同时连到邮电局，信号同时在这两路电话线上传递，那这样就可以实现“软切换”了。当你要移动到隔壁的房间咋办，不要紧，你把现在这根电话线拔了，插到隔壁房间里的另一个口上或是别的房间里的电话口上都可以，这个过程中不会产生通信中断，因为你和隔壁房间的电话线还连着呢，同时有多路信号相连，这就是软切换的本质！

对于GSM来说，它只有一套信号滤波器，滤波器锁定在目前通信的工作频点。而GSM的邻区工作频点都是不一样的，要完成切换，必须更改当前信号滤波器的频段，等调谐到要切换的频率才能和新的基站建立通信，因此必然有个先断后连的“硬切换”过程。如果一定要让GSM实现软切换也并非不可能，只要在终端上增加一套射频处理单元即可，这无疑会增加成本。对于CDMA系统来说，软切换要简单得多，因为它的所有载频都工作在一个频段。但当它因为系统扩容上了二载频、三载频以后，同样也会面临只能硬切换的问题。

我们在上面介绍了切换的基本概念，那么什么时候需要切换呢？

在无线通信里，通常有两个参数来衡量是否需要切换：接收信号的强度和通话质量。手机是有一定灵敏度的，信号太弱了将无法正常工作。通常信号的强度越强，通话质量就会越好。因此，信号强度是决定切换的一个很重要的指标。日常生活中，我们一般用手机信号有几格来判断接收信号的强度。

切换的时候往往会涉及多个基站，一个基站只了解自身的信号和资源情况，而并不了解其他基站的具体情况，因此通常要将终端以及基站本身测量的信号接收的强度上报给基站控制器，最后由基站控制器决定是否进行切换。

2.3.4 困惑四：安全性和盈利？这是个问题

如果不考虑商业上的问题，那么我们的移动通信系统到 2.3.3 小节中就已经基本完善了，只要肯花钱在世界上布满基站，那么“任何时间”、“任何地点”和“任何人”交换信息都不成问题（我们在这里没有提“任何方式的信息”，这个涉及如何提高传输速率的问题，放到第4章里去讨论）。

然而，这样一个庞大的通信系统，其成本投入是非常高昂的。这样大的投入要能维持下去就必须要赚钱，就必须考虑商业模式的问题。在这个商业通信系统里，要考虑的首要问题就是——如何鉴别想接入系统的用户是不是合法用户？

所谓的合法用户是指已经付费并获得接入网络资格的用户。道理很简单，经营移动通信就和经营一场演唱会一样，如果你没有能力鉴别试图进入演唱会现场的人的门票的真假，你早晚会赔得倾家荡产。



你入网的时候，运营商会给你一张 SIM 卡，SIM 里面有 IMSI 号，IMSI 号可以唯一确定这个用户。就好比你买了一张音乐会的门票，门票上有序列号，每个序列号都是唯一的。最关键的地方不在这里，而在如何建立防伪机制。

无线通信中的防伪机制在《林海雪原》里面有过生动的演绎。座山雕下面的小喽罗想验证杨子荣身份的真伪，于是喊出了一声“天王盖地虎”，杨子荣答上了一句“宝塔镇河妖”，这就算对上了，自己人！我们不妨也根据这个经典桥段来设计一下无线通信网对手机的身份验证，看看是否行得通，如图 2.26 所示。

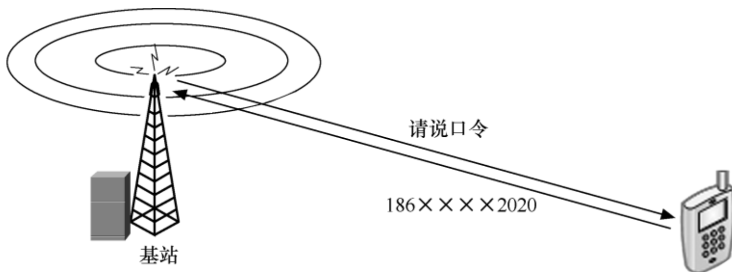


图 2.26　口令方案一

由于手机号码是大家最熟悉的，那么我们首先来考虑用手机号码作口令是否合适。答案是显然的，很不合适，因为电话号码是公开的，用来作口令的话跟没口令没什么区别。那么用 IMSI 号行不行呢，也不行，IMSI 号的换算也很简单，而且，IMSI 号是可以通过运营商的营帐系统查到的，没有什么机密可言。如果用这两个号作口令，别人想仿冒你那就太简单了。

于是，GSM 系统的设计者们一咬牙，想出来一个狠招。他们在 SIM 卡里内置了一个叫 Ki 的参数，Ki 与 IMSI 号是相关的，不同的 IMSI 号的 Ki 不同。用户购机入网的时候，运营商将 IMSI 号和用户鉴权键 Ki 一起分配给用户，同时在核心网鉴权中心 AuC 里也存了这两个值。IMSI 号对外可见，Ki 对外不可见。

当手机想接入网络的时候，先会有个鉴权，鉴权的方式是由 Ki 和一个固定的数值通过一个叫 A3 的算法生成一个值叫 SRES，然后就形成两个参数（IMSI，SRES），并将这两个参数发送给基站。基站将两个参数发送到核心网，核心网的 ACU 里面也会进行相同的运算，生成相同的参数，两组参数一对比，如果一致的话就认为你是合法用户，如图 2.27 和图 2.28 所示。

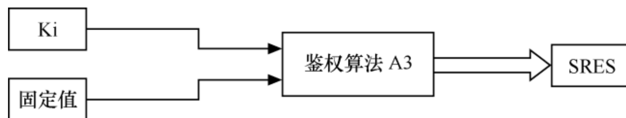


图 2.27　SRES 生成过程一

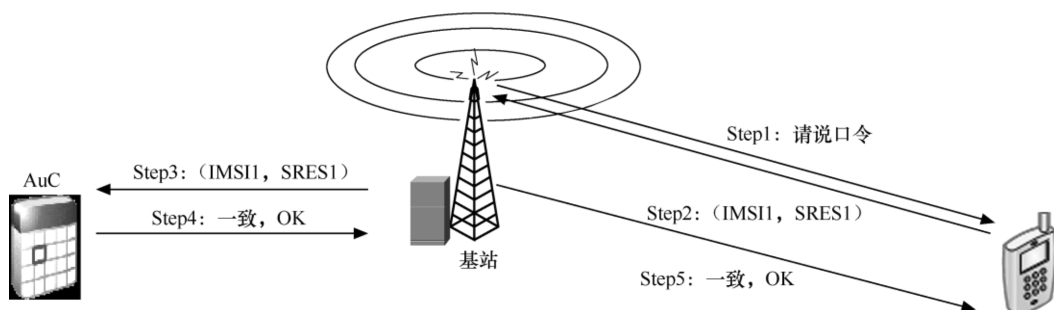


图 2.28　口令方案二

我们看到，口令方案二相比口令方案一有了长足的进步。光知道 IMSI 号已经不足以去冒充一个用户了，因为 Ki 值你是不知道的，所以由 Ki 值生成的 SRES 值你也是不知道的。而系统又需要 SRES 值来鉴权，于是乎，这个系统看起来似乎挺安全了。

但是，依然有个致命的漏洞，那就是，空中接口的信息可能被窃听！拦截电磁波然后解密窃听并不是什么新鲜事了，大家经常可以从电视的谍战片里看到。如果你打电话的时候旁边有人架起窃听装置，窃取了你空中接口传的 IMSI 号和 SRES 号，那么他下次就可以用这组鉴权信息来接入网络了。

这是一个很令人头痛的问题，一番苦思冥想之后，GSM 的设计者们还是找出了应对的办法，那就是空中接口的 SRES 只用一次，下次就废掉，每次都变，你拦截这个信息也没有用，然而，我们如何才能让 SRES 每次的内容都不一样呢？答案就在图 2.27 上，我们可以把那个固定值变成随机值，那么由随机值和 Ki 生成的 SRES 值，也就变成了随机变化的了，如图 2.29 所示。

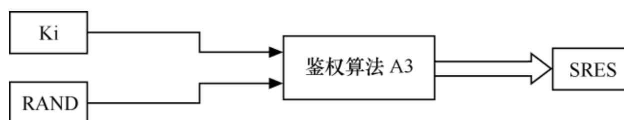


图 2.29　SRES 生成过程二

然而，这个 RAND 值怎样生成呢，GSM 网络选择了由网络来告诉手机当前的 RAND 值。那么口令方案二就变成了如图 2.30 所示。

大家可以看到，方案三和方案二的关键区别就是图 2.30 圆圈所示部分，网络给手机下发了一个随机参数，让手机根据随机参数生成响应数 SRES。

方案三就是 GSM 现网所采用的方案，有了方案三，我们就能确保将非法用户拒之门外。但仍然有一件很讨厌的事情，就是别人虽然不能通过鉴权来冒充你，但由于电磁波在空中是四散传播的，他依然可以窃听你，这很让人讨厌！

于是，我们想把空中接口传送的话音信息进行加密，让他即使拦截到了比特流，也



搞不懂我到底说了什么。在这里，我们一定要吸取鉴权方案的经验教训，话音信息用来加密的密钥，一定也要是随机的！于是，就有了图 2.31 所示的密钥生成方案，Kc 就是所生成的密钥。

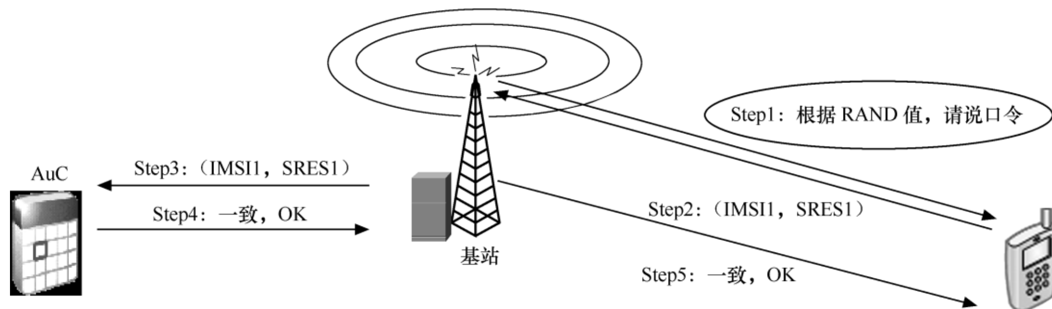


图 2.30　口令方案三

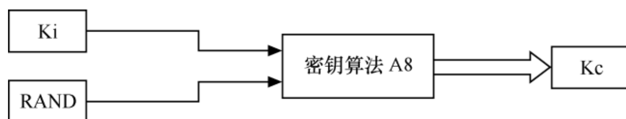


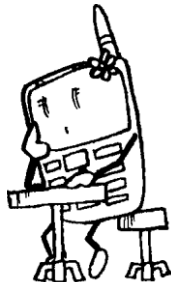
图 2.31　密钥 Kc 生成方案

嘿嘿，大家看到图 2.31 所示的密钥生成方案，是不是有似曾相识的感觉。没错，总共就 Ki 和 RAND 这么两个参数，用 A3 算法就生成鉴权响应 SRES，用 A8 算法就生成加密的密钥 Kc。方式基本一模一样，真有够偷懒的。随机变化的密钥 Kc 和原始话音信号进行异或运算，就得到了加密后的比特流。

对于 WCDMA，其鉴权与加密的方式也与此非常类似，只不过更复杂一些。

到本节为止我们就完成了一个移动通信网的主要架构的学习。到目前为止，这个看起来还比较粗糙的系统就已经能够完成“任何时间”、“任何地点”和“任何人”之间的无线通信了，至于“任何方式的信息”的交换，我们放到后面的章节来阐述。第 1 章和第 2 章我们了解的都是一个无线通信系统的概貌，从第 3 章开始，我们就要来学习 GSM、WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000、LTE 等一个个具体的移动通信网了。看后面章节的同时，不妨也回来翻翻前两章，因为前两章构成了整个移动通信网的骨架，是后面内容的基础和概括性的内容。

第3章 Chapter 3



小笨设计的GSM网络—在云端的邮政局

在第2章中我们简单地介绍了一些移动通信网的基本概念，比如复用（时分、频分、码分）、功率控制、DTX和DRX、时间同步。从这一章开始我们要把这些内容落地，也就是来看看一个真正的移动通信网是怎样构成的。

我们会从GSM开始，逐步来介绍GPRS、EDGE以及3G乃至LTE的内容。对于GSM和后面内容的关系，大家可以这样理解，GSM就好比是很多年前的邮政局，只能提供标准化的平信服务（GSM的话音业务）。随着社会的快速进步和生产生活的需要，逐渐开始可以提供小包裹的快递服务（GPRS和EDGE提供低速率数据业务）。光是提供一两千克物品的快递服务还是不能满足人们生产生活的需求，于是物流兴起了，不管是彩电冰箱，抑或是沙发席梦思，都可以送到家（3G及LTE可以提供高速率数据业务）。

当然，我们的通信技术和邮政的发展还是有根本性的区别的，邮政承载的物流业务是用卡车、火车来运输的，而通信承载的业务是用电磁波来承载的。卡车运输有速度、载重、油耗等一系列因素限制，而电磁波只有功率、频谱宽度的限制，这构成了两个系统本质的不同。

在这一章里，我们希望按循序渐进的方式来介绍GSM网络，因此安排了一个叫“小笨”的主人公来跟大家一起一步步学习GSM网络。作者认为，这种启发式的学习方式能让我们更快速地理解网络并加深对它的印象。

3.1 小笨的恼人课题— 画一个GSM网络出来

小笨就要大学毕业了，在这之前他接到了老师分配给他的毕业设计课题。打开



之后他不禁倒吸一口凉气，因为老师写了这么一行字：“设计一个 GSM 网络，所谓 GSM，也就是 Global System of Mobile Communication，走遍全球都能打电话，你的明白？”

小笨看得头昏脑涨，眼前发黑，在 MSN 上给老师敲了一串字：“老板，你这不是存心不让我过毕业设计么，我的不明白！”

滴滴滴…MSN 上的头像跳动起来，飘过来一行字外加一堆表情：“毕设的评委，一堆搞光通信的，一个搞小波分析的，唯一一个搞无线的，人家研究的是 LTE-Advanced！大家研究的都是前沿科技，谁搞得清楚你个 GSM 是咋回事，你把系统结构搞清，把信道整明白，把打电话的流程画出来不就够了。何况这些东西，你去了运营商也好，去了设计院、设备商也罢，都用得着。这就叫搂草打兔子，两不误！你的明白？？？!!!”

小笨这才明白老师的良苦用心，兴高采烈地跑到图书馆查资料。

3.1.1　信息如何流动与交换

通信的英文名叫做“communication”，所以一个通信系统首先要解决的问题就是怎样交换信息，只有这个最基本的任务完成了，才能谈得上其他。

话说小笨跑到图书馆，找到了一本名为《大话移动通信》的书，在 2.1.4 节中发现了图 2.9。顿时欣喜若狂，原来这个课题如此简单！他大笔一挥，就照着描了下来，然后做了点修改，如图 3.1 所示，就拿给老师过目。他是这样描述他的设计的：“这是一个地市的 GSM 网络，由很多个基站（BTS，Base Transceiver Station）组成，每个基站覆盖一片区域。基站有 3 个功能，一是和手机进行通信，二是进行功率控制，三是进行基站间切换。所谓基站和手机进行通信，是指用户 A 和用户 B 通电话的时候，他们之间不直接通话，而是通过基站来中继消息；所谓功率控制，是指基站来对手机和自身的发射功率进行控制，让功率不要太大或者太小；所谓‘切换’，是指当用户 A 通话过程中由基站 3 所在区域移动到基站 4 所在区域时，可以有一个‘切换’的过程，即基站 4 接替基站 3 来继续通信，这期间用户没有中断的感觉。每个用户是需要一张 SIM 卡的，因为要存储用户的手机号码等信息。”

1．移动交换中心— MSC

导师看了小笨的草稿，眉头一皱，说：“用户之间通话由基站进行中继，也就是基站之间互相通信咯，话说基站之间如何通信呢？”

小笨头也没抬，随口答道：“这很简单，基站之间，可以两两相互连起来嘛，用电缆也好，用光缆也罢”。

“啪”小笨头上挨了一戒尺。



“两两相连，你图上只画了四五个基站当然好两两相连了！要是有 100 个基站，有 1 000 个基站，乃至几千个基站，用电缆两两相连，你打算把整个城市织成蜘蛛网吗？”导师怒道：“无线的事情你搞不明白，有线的事情总该明白吧。你家的固定电话，难道和你女朋友家的有根电缆直接相连么？难道你打电话不是先连到邮电局，在邮电局进行一下信号处理再发送到你女朋友家？”

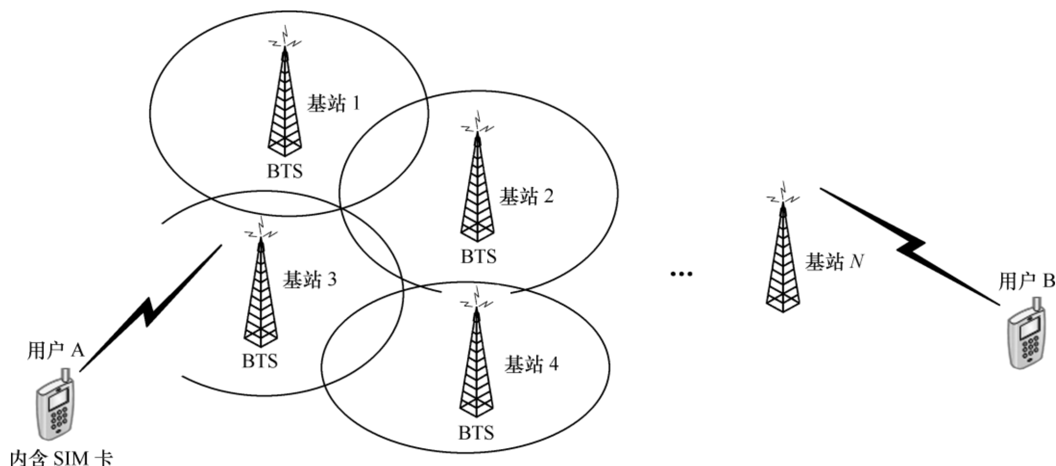


图 3.1 小笨画的“GSM 网络”稿 1

小笨平时很喜欢看战争片，他蓦然想起以前的摇柄式电话，抡起膀子一通摇之后并不是直接就接到了对方，而是接通了接线员，然后跟接线员说：“喂，我要接×××”。随着有线通信的发展，这个接线员后来就演变成了固定电话里的“程控交换机”，再打电话的时候就由程控交换机进行自动接续而不再由人工来操作了。看来在移动通信网里，也必须有这么一个角色把整个网络串起来，那么应该把它叫什么名字好呢，固话的叫做“程控交换机”或者“交换中心”，那么移动通信的不妨就叫“移动交换中心（MSC，Mobile Switching Center）”吧！于是，他把图 3.1 修改成图 3.2 的样子。

2. 基站控制器— BSC

稿 2 相对稿 1 增加了一个 MSC，基站和 MSC 之间通过线缆相连。看起来比稿 1 完善了不少。但是小笨吸取了教训，没有轻易交给老师，而是自己先检查检查，看看方案有没有漏洞。很快，他就发现了一个问题，那就是上面自己列的基站的几个功能并没有完全落地，比如说“切换”究竟应该由谁来负责？“功率控制”又由谁来负责？

首先的想法是这些活都由 MSC 来负责，因为手机信号的切换涉及多个基站之间的协调，功率控制的好坏对全网的干扰水平也有影响，MSC 和所有基站都相连，可以掌控全局。由它来干这活最好不过。但是一个地市的网络实在太大了，很可能有几千个基站。



光是这些基站下的用户的数据交互就够 MSC 忙的了，再把“切换”、“功控”等一大堆活扔给它它可实在受不了。小笨灵机一动，在图 3.2 的基础上添加了一种新的设备来负责这个工作，这个设备叫做基站控制器（BSC，Base Station Controller），一个基站控制器可以管理几十乃至几百个基站，每个基站控制器负责城市的一个区域，这样问题就解决了，如图 3.3 所示。

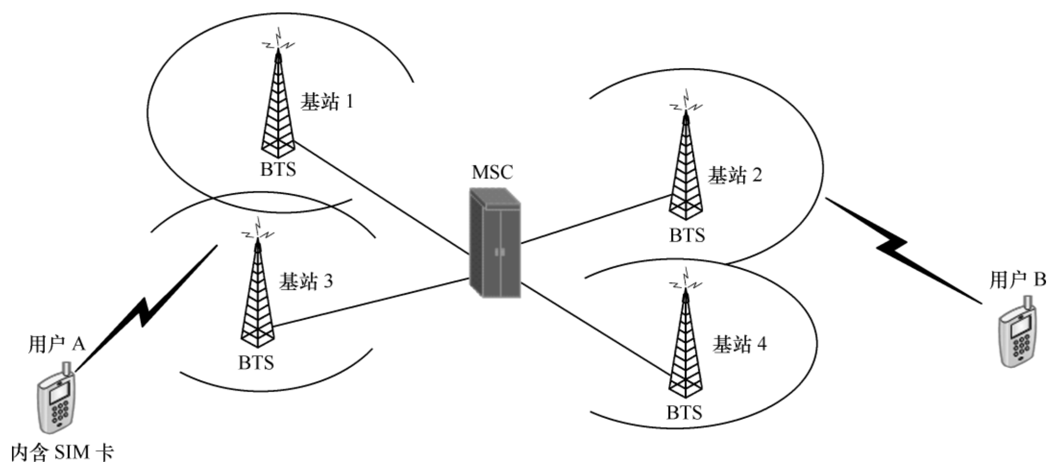


图 3.2 小笨画的“GSM 网络”稿 2——增加了 MSC

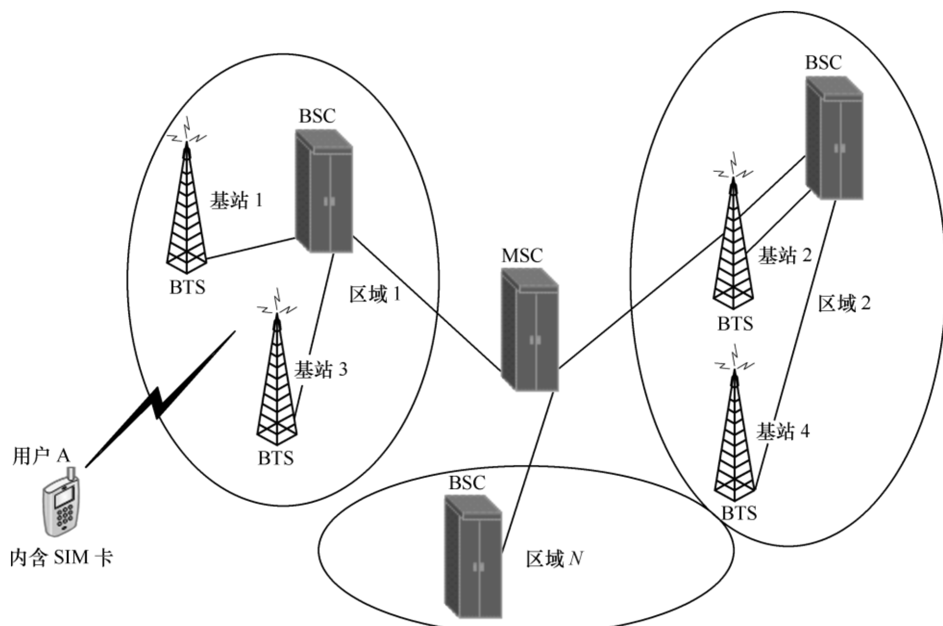


图 3.3 小笨画的“GSM 网络”稿 3——增加了 BSC

小笨把稿 3 递给了老师，老师颔首一笑："嗯，不错，有点样子。可以以此为框架继续完善了"。

3.1.2 用户的位置如何进行登记与管理

移动通信相对于固定通信一个重要的区别就是座机的位置是一成不变的，而手机的位置在不断地变化，所以移动通信网需要时时刻刻了解手机现在的位置。当有电话过来的时候，才能顺利找到手机。

小笨得到了老师的夸奖，心中高兴，但他并不满足于此。因为他现在构思的 GSM 网络，只不过是一个城市的，离"Global System"的要求，还差得很远。先不说世界，要想实现全国一张网，要解决的一个重要问题就是要能实时监控用户当前的位置信息，也就是网络必须知道用户此时此刻在哪个地市的哪个区域，否则别人要能随时和这个用户进行联系就是一句空谈。就比如说图 3.3 中的用户 A，他现在在上海，如果他跑到苏州去了，用户 B 要找他，怎么才能知道他去苏州了？

1. 归属位置寄存器— HLR

小笨于是决定在图 3.3 的基础上再增加一种设备，这种设备叫做归属位置寄存器（HLR，Home Location Register）。这种设备的作用很简单，假如用户 A 是在上海开的卡，那么开卡的时候他的用户信息就会存在 HLR 里，并且分配一个电话号码和 IMSI 号，这些信息一直不变，在 HLR 里称为静态信息。另外，还有一个信息是变化的，那就是用户 A 现在在哪个 MSC 下（假设一个城市一个 MSC，那么得到了 MSC 的信息也相当于知道了他在哪个城市）。HLR 存储的信息如图 3.4 所示。

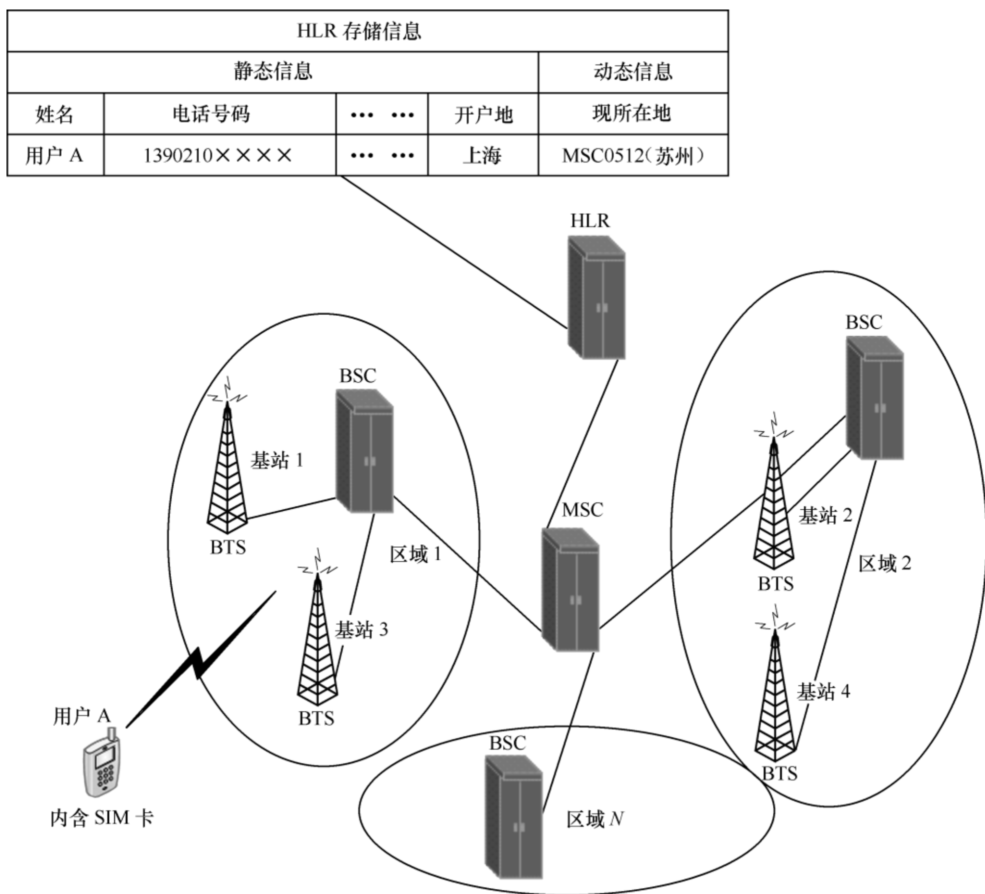
HLR 存储信息				
静态信息				动态信息
姓名	电话号码	……	开户地	现所在地
用户 A	1390210××××	……	上海	MSC0512（苏州）

图 3.4 HLR 存储的信息

于是，小笨就画出了新的结构图，如图 3.5 所示。

大家可能已经发现了，我们在上面所述内容没有提到一个重要的问题，那就是"HLR 怎么知道用户 A 去了苏州"，只有这个问题得到解决，HLR 才能有效刷新动态信息。其实这个问题也不难，用户号码和 IMSI 号都是按号段分配给某个城市的。上海的用户到了苏州，苏州的 MSC 首先一查 IMSI，发现不是自己所在地用户，就会给上海的 MSC 发一个消息，要求上海的 HLR 更新数据。





HLR 存储信息				
静态信息				动态信息
姓名	电话号码	··· ···	开户地	现所在地
用户 A	1390210××××	··· ···	上海	MSC0512（苏州）

图 3.5　小笨画的“GSM 网络”稿 4——增加了 HLR

2. 拜访位置寄存器——VLR

到了图 3.5 这个阶段，我们已经可以知道用户处于哪个城市（或者说处于哪个 MSC 下）了，但是还不知道用户到底处于城市的哪个区域（或者说处于哪个 BSC 下）。有了设计 HLR 的经历，这个问题也难不倒小笨，他又想出了一种叫拜访位置寄存器（VLR，Visitor Location Register）的设备，这种设备可以存储一个用户具体到哪个 BSC 的位置信息。那么他把图 3.5 稍微修改一下，就成了图 3.6。

大家应该也发现了，对于 VLR，我们也没有解释一个问题，那就是“VLR 怎么知道用户 A 在 BSC1 下”，这个问题请参见 2.3.2 小节的位置区更新等相关内容。如果知道了用户 A 在哪个 BSC 下，那么怎么知道用户 A 具体在哪个基站下呢？请参见 2.3.2 小节寻呼等相关内容。

VLR 存储信息				
姓名	电话号码	··· ···	开户地	现所在 BSC
用户 A	1390210××××	··· ···	上海	BSC1

图 3.6　小笨画的“GSM 网络”稿 5——增加了 VLR

到了图 3.6，应该说小笨所画出的“GSM 网络”和现网中所用到的 GSM 网络就非常接近了。但是细心的朋友一定发现了，我们在 2.3.4 小节中提出的一个重要的概念“鉴权”，在图 3.6 中并没有体现，这个鉴权的设备叫做“鉴权中心”（AuC，Authentication Center）。通常，现网 MSC 和 VLR 合设成一个物理实体，HLR 与 AuC 合设成一个物理实体，那么一个真正的 GSM 网络就如图 3.7 所示。

问题到这里并没有结束。如果我们把一个个手机用户比作军人的话，那么 BTS 就好比连部，BSC、MSC 就好比团部、师部，HLR 和 VLR 就好比师部和团部的档案科，AuC 就好比军队的特务科。军队要指挥有序，那么每一个作战单位都必须要有编号；GSM 网络要运行有序，那么每一个通信单元也必须要有编号，这就是下一小节要介绍的内容。



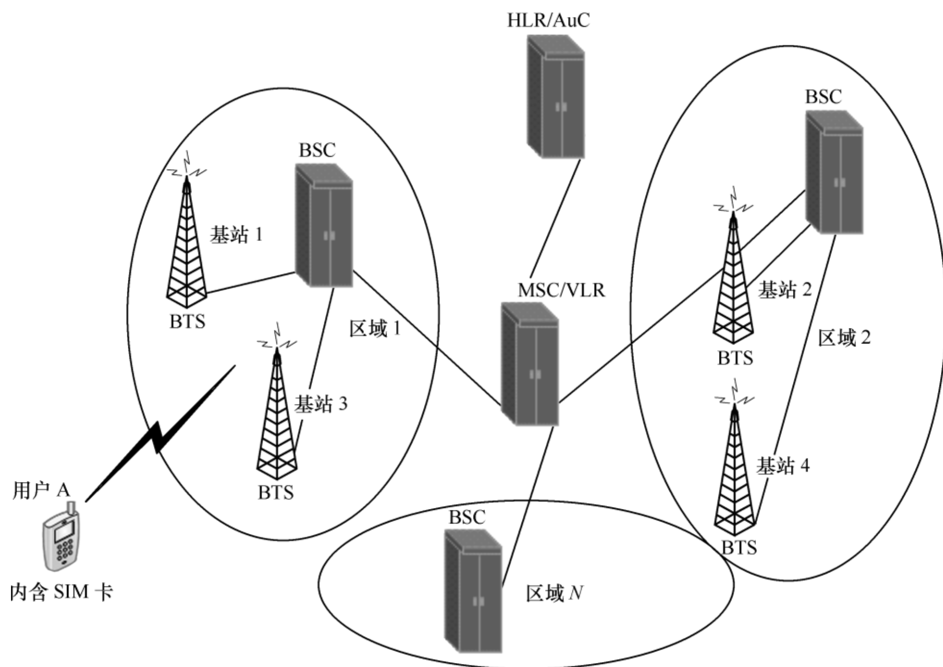


图 3.7　实际的 GSM 网络

3.1.3　我也要“门牌号码”— GSM 的编号计划

我们看到，像图 3.7 所示的网元设备，已经不少了。而在一个城市里，用户和基站的数量远比这个要多得多。比如手机用户，通常是几十万乃至上百万量级的，基站通常是几百到上千个，数量相对较少的 BSC，也有十几到几十台。

管理这样庞大的一个系统需要科学的编号方法，我们不妨来参考一下中国邮政的做法。

面对 960 万平方千米的广袤土地和 13 亿的人口数量，邮政只用了两个编码就能轻松搞定。那就是“收信人地址+收信人”，这两条信息标识了一个唯一的收信对象，保证邮局不会送错。

一个好的编码计划需要有两点：一是标识的唯一性，比如说下面的收信地址“湖南省长沙市沿江大道×××号”，如果长沙不止一条沿江大道，那就尴尬了，邮递员面对两个地点将会无所适从，为了保证唯一性，通常会用“沿江大道东路”和“沿江大道西路”来进行区分，总之，重复是要绝对避免的。二是标识要方便检索，比如你要对地理位置进行一套编号，你也完全可以按经纬度进行编码，这种编号方式也绝对是唯一的，“东经 112.56，北纬 28.37”，你在地图上绝对找不出第二个点来。但是这样一来，你打算让邮

递员带一个 GPS 出门吗？对于信件的查找和分类而言，采用经纬度显然没有“省+市+县（区）+街道+门牌号”这样的分级检索方式好用。

对于 GSM 的编号计划而言，也需要满足以上两个条件。首先，唯一性是必须满足的，要是你的手机号与别人的相同，或者某个信令点的编码和另一个信令点的编码相同，那整个就乱了套了；方便检索肯定也是要的，大家都知道有个叫“手机归属地查询”的软件，其诀窍就是这个软件有一个数据库，数据库可以根据手机号码的第 4～7 位来判定手机的归属地，比如说 133-0731-××××，一看中间的 0731，就知道是来自长沙的。这种编号方式很重要，极大地方便了 HLR 的寻址。

在 GSM 网络里，有 4 个号码极其重要，分别是 MSISDN 号、IMSI 号、LAI 号、CGI 号，我们下面就对这 4 个号码分别进行讨论。至于其他的 MSRN 号、HONR 号、TMSI 号、BSIC 号、IMEI 号，大家在进行具体的维护或者网优的时候会遇到，就不在这里讨论了。

1. 移动台的国际 ISDN 号码（MSISDN）

MSISDN（Mobile Station International ISDN Number），简单一点说就是你的手机号码，它的具体结构如图 3.8 所示。



图 3.8　MSISDN 的组成

图中各部分解释如下。

CC（Country Code）=国家码，即在国际长途电话通信网中要使用的标识号，中国为 86，虽然很多人并不打国际电话，但是对于这个号码应该并不陌生，发短信的时候经常看见一条来自“86139××××××××”的短信，说明虽然你是给国内的手机用户发短信，但是运营商还是把这个国家码给你加上了。

NDC（National Destionation Code）=国内目的地码，即网络接入号，也就是平时手机拨号的前 3 位。中国移动 GSM 网的接入号为“134～139”、“150～152”、“157～159”，中国联通 GSM 网的接入号为“130～132”、“155～156”。

SN（Subcriber Number）=用户号码，采用等长 8 位编号计划。

MSISDN 的前面部分 CC+NDC+H0H1H2H3 其实就是用户所属 HLR 的地址。

如一个 GSM 联通手机号码为 861300737××××，86 是国家码（CC）；130 是 NDC，用于识别网络接入号；0737××××是用户号码的 SN，其中 0737 用于识别归属区，说明这是一个湖南益阳的用户。

2. 国际移动用户识别码（IMSI）

值得说明的一点是，虽然作为用户的我们平时都是用的 MSISDN 号，但对于通信设



备识别用户而言，它们有自己的套路，它们并不用 MSISDN 号，而是使用自己的一套编号计划，叫做“E.212”编号计划。

为了在无线路径和整个 GSM 移动通信网上正确地识别某个移动用户，就必须为移动用户分配一个特定的识别码。这个识别码称为国际移动用户识别码（IMSI，International Mobile Subscriber Identity），用于 GSM 移动通信网的所有信令中，存储在用户识别模块（SIM）、HLR、VLR 中。

MSISDN 与 IMSI 的关系有点类似于一个人的姓名与身份证号的关系，虽然我们平时都是以姓名相称呼，但是公安局也好、民政局也罢，还是通过你的身份证号来唯一地识别你。甚至你的姓名还可以去修改，但是身份证号却不会变；同样，你也可以去运营商处修改你的号码，只要你的 SIM 卡没扔，你的 IMSI 号还是不会变。

如图 3.9 所示，IMSI 号码结构为：

IMSI=MCC+MNC+MSIN

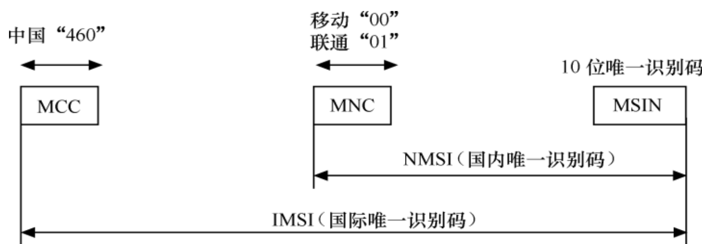


图 3.9　IMSI 号的组成

MCC（Mobile Country Code）=移动国家号码，由 3 位数字组成，唯一地识别移动用户所属的国家，我国为 460。

MNC（Mobile Network Code）=移动网号，由 2 位数字组成，用于识别移动用户所归属的移动网。中国移动的 GSM PLMN 网为 00，中国联通的 GSM PLMN 网为 01。

MSIN（Mobile Station Identity Number）=移动用户识别码，采用等长 10 位数字构成，用于唯一地识别国内 GSM 移动通信网中的移动用户。

3. 位置区识别码（LAI，Location Area Identity）

LAI 代表 MSC 业务区的不同位置区（如图 3.10 所示），用于移动用户的位置更新，比如图 3.7 的区域 1 到区域 *N*，就是用这个编号来进行识别的。现网中通常一个 BSC 分配一个 LAI 号，这样比较简单。其号码结构为：

LAI = MCC + MNC + LAC

MCC=移动用户国家码，用于识别一个国家，同 IMSI 中的前 3 位数字。

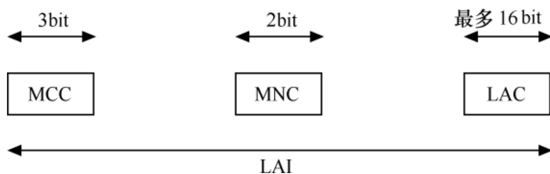


图 3.10　LAI 号

MNC = 移动网号，用于识别国内的 GSM 网，同 IMSI 中的 MNC。

LAC = 位置区号码，用于识别一个 GSM 网中的位置区，LAC 的最大长度为 16bit，在一个 GSM PLMN 中可定义 65 536 个不同的位置区。

4. 全球小区识别码（CGI，Cell Global Identifier）

如果说 LAI 能精确到某个用户处于哪个区域的话，那么 CGI 号就可以区分到这个用户具体是在哪个基站的哪个扇区下了。通常情况下，一个基站有 3 个扇区。它的结构是在位置区识别码（LAI）后加上一个小区识别码（CI，Cell Identity），如图 3.11 所示，其结构为：

$$CGI = MCC + MNC + LAC + CI$$

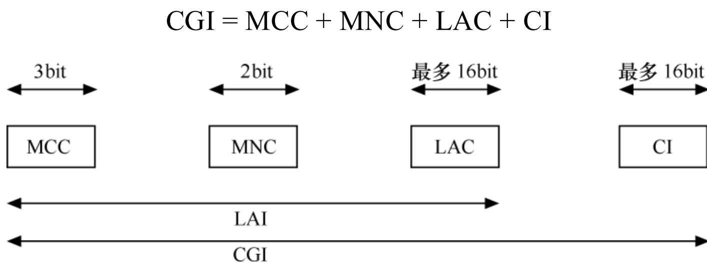


图 3.11　CGI 号

MCC = 移动用户国家码，用于识别一个国家。

MNC = 移动网号，用于识别国内的 GSM 网。

LAC = 位置区号码（在一个 GSM PLMN 中，可定义 65 536 个不同的位置区）。

CI 是小区识别代码。

到这里 GSM 的网络结构和编号计划就探讨完了，接下来我们要讨论一下 GSM 的接口。

3.1.4　街道也要标识— 谈谈 GSM 里的接口

我们在上一小节里谈到了各种各样的编号，比如 MSISDN 号、IMSI 号、LAI 号、CGI 号。我们可以用这些编号去定义一个用户、定义一个位置区、定义一个基站的 3 个小区。看起来编号计划非常完备，是这样吗？我们来看看图 3.12。



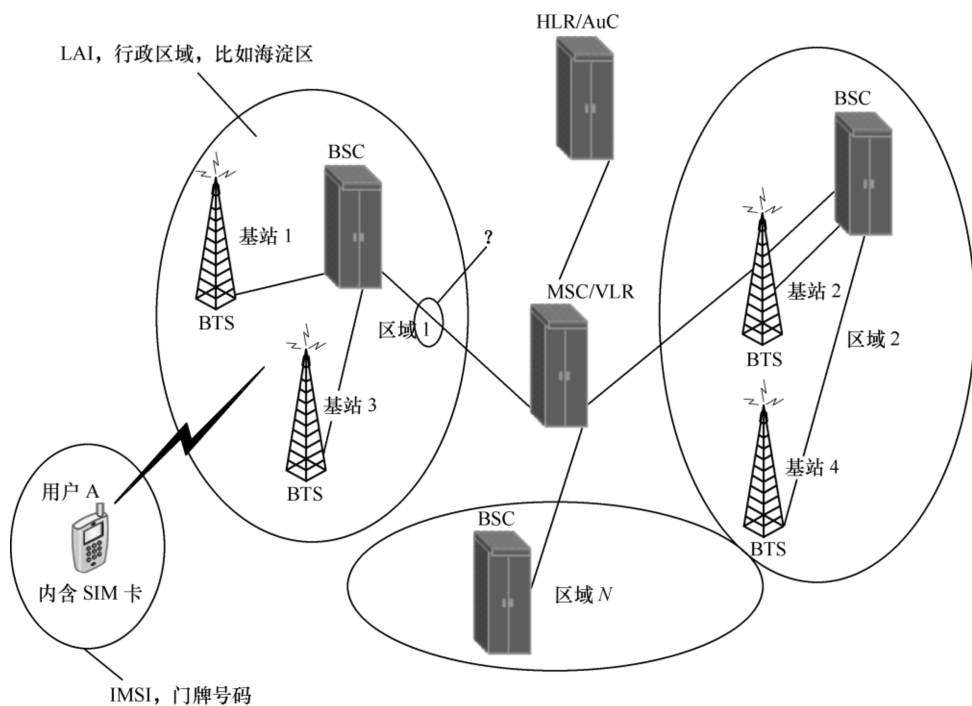


图 3.12　IMSI&LAI&问号

假如我们把用户的 IMSI 号比喻成门牌号码，LAI 比喻成某个城市细分的一个行政区域，比如北京的海淀区。那么我们一定会发现一个问题，也就是“街道”没有去定义，没有去编号。光给行政区和某家某户进行编号，不给道路编号，能找到人吗？

在 GSM 中，也习惯把这些通道（也即“街道”）叫做接口。对于 GSM 而言，通常我们只需要了解 3 个接口就够了。第一个是手机和基站的接口，俗称“空中接口”，在 GSM 中称作“Um”接口；第二个接口是基站 BTS 与基站控制器 BSC 之间的接口，在 GSM 中称作“Abis”接口；第三个接口是基站控制器 BSC 和移动交换中心 MSC 之间的接口，在 GSM 中称作“A”接口。如图 3.13 所示。

这 3 大接口中，Um 接口和 A 接口是开放的，而 Abis 口是私有的，各个厂家可以自己定义。Abis 口私有带来的结果就是，BTS 和 BSC 必须是同一个厂家的，否则就无法进行对接，假如你买了爱立信的 BSC，那么你的基站就没有办法用华为的，因为两者之间不兼容。运营商们很不喜欢这种限制，这对他们制衡厂家，防止垄断造成了麻烦。于是，到了 3G 时代，在运营商的干预下，这个接口在制定标准的时候也变成了开放的了。

而 A 接口，则是无线接入网与无线核心网的分界线。我们通常把 A 接口靠近用户这

一侧的称为无线接入网，包含 BSC 和 BTS，而把 MSC、HLR 这些设备称之为无线核心网。如果大家有机会去运营商，一定可以发现它的技术部门下面有两个中心，一个叫“无线中心”，一个叫“交换中心”，对应的就是无线接入网和无线核心网。而在设备商里，这就是对应的无线产品线和核心网产品线了。

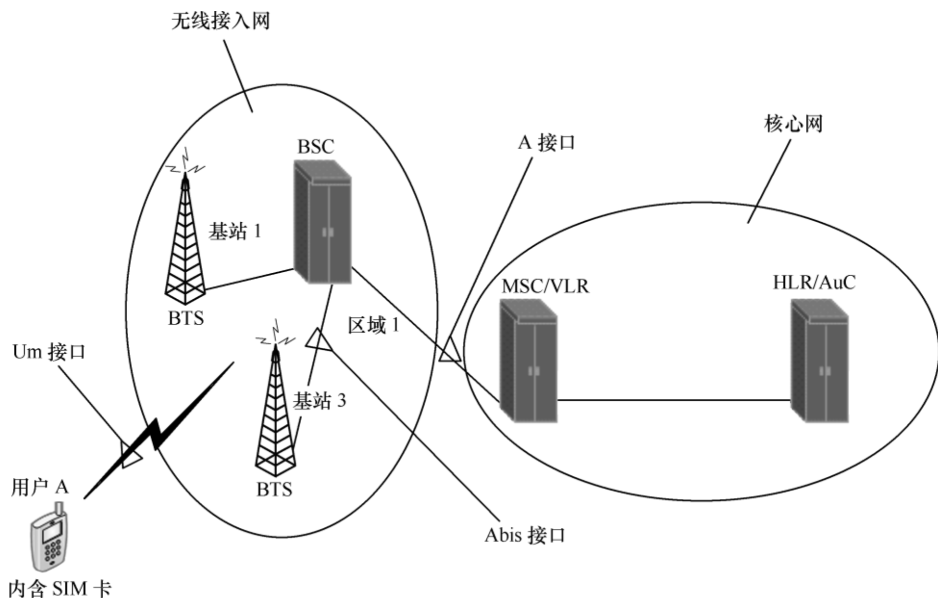


图 3.13　Um 接口、Abis 接口、A 接口

3.2 GSM 是怎样炼成的—　空中接口的 4 个步骤

在上一节里，我们讨论了整个 GSM 系统的构架，在这节里，我们只关注如图 3.14 所示圆圈部分，也就是 GSM 系统的空中接口。因为空中接口可以称得上一个无线通信系统的“皇冠上的明珠”，研发也好，维护、网优也罢，很大一部分工作都是围绕空中接口来展开的。

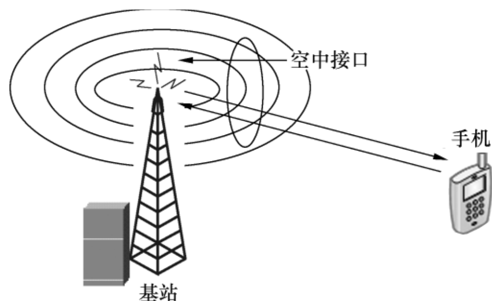


图 3.14　空中接口

在 2.1 节中，我们讨论过，空中接口的频谱资源是非常有限的。在 2.2 节中，我们也说过，GSM 是一个频分复用系统，每个频点是 200kHz。那么 GSM 怎么样来用好这 200kHz 资源，从而使得它能够有效地开展通



信业务呢，这是一个很有意思的命题。我们就以 1 个载频（200kHz 频谱带宽）为例来解释 GSM 系统是如何运行的。

我们知道，GSM 系统，不但是一个频分系统，而且还是一个时分复用系统。在 2.2.1 节中我们讨论 TDMA 的时候，已经说过了，GSM 在时间域上又分为 8 个时隙，每个时隙可以承载 1 个用户，在这里，我们首先要搞清楚时隙的概念，如图 3.15 所示。

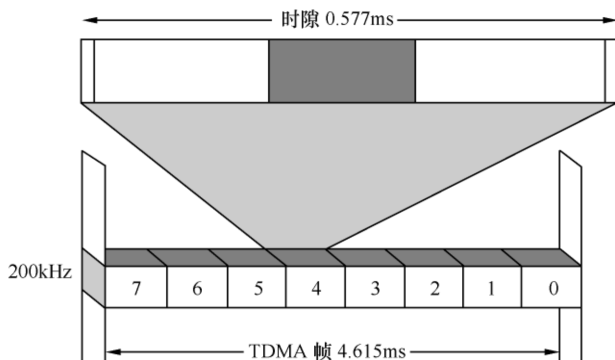


图 3.15　时隙与 TDMA 帧

GSM 里面的时隙是一个频域和时域两个维度上的概念。在频域上，是 200kHz，在时域上，是 0.577ms。时隙的时间如此之短，这跟大家想象的或许不一样。大家可能认为我们把 8s 分成 8 份，每个用户通话 1s，如果采用这样的技术方案，那么一个用户每间隔 8s 才能说一次话，延时就太长了，谁也忍受不了。而一个时隙 0.577ms，下一次轮到这个用户说话间隔只要 $0.577 \times 8 = 4.615$ms，这么短的时间大家没什么感觉。

大家在这里一定要记住两个概念：（1）时隙是我们的基本通信单位；（2）时隙的时间长度是 0.577ms，而 8 个时隙（也就是一个 TDMA 帧）的时间是 4.615ms。

接下来我们就要来谈时隙和 TDMA 帧的具体应用了。我们知道，一个公司要运转，光有业务人员不行，一定要有管理人员；同理，GSM 系统要运转，不能把 8 个时隙拿来打电话，一定要有时隙用来传递管理信息。公司管理的智慧在于，公司能够养活的人数就这么多，看拿多少人用来做管理，多少人用来做业务才能达到一个最佳的平衡，最好是管理的消耗越少越好。GSM 也是如此，它把 7 个时隙（1～7 号时隙）用来承载业务，只留 1 个时隙（0 号时隙）用来管理控制整个系统。而 0 号时隙又被称为 BCCH（Broadcast Control CHannel，广播控制信道）时隙，之所以被称作这个名字是因为这个时隙一个主要的工作就是广播系统消息，如图 3.16 所示。

1～7 号时隙是完全一样的，它们之间没有什么区别。而 0 号时隙玄机就大了，我们接着往下看。

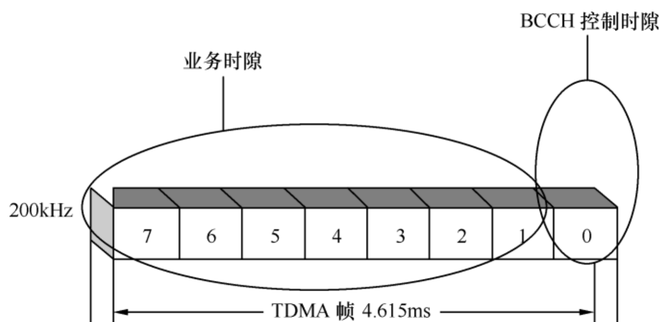


图 3.16　业务时隙与控制时隙

3.2.1　欲通信，先同步

我们在 2.3.1 节中已经讨论过了，手机是不知道它处在哪个基站下的，也不知道这个基站的位置区号（LAI）、小区号（CGI）等等一系列相关的信息，这些信息都需要基站来告诉它。问题是，基站怎么来告诉手机这些信息呢？

回忆一下我们读书的时候用收音机听新闻的场景。

（1）手动旋转调频旋钮，收音机里传来“沙沙”的声音，直到调到某个位置，声音突然清晰了，此时我们完成了锁定某个频道（或者说频率校正）的过程；

（2）如果运气比较好，能听到悦耳的报时声，“现在是北京时间××点整，××频道欢迎您”；

（3）如果运气比较背，这个频道开始自吹自擂地给自己打广告了，“××频道是××地区专业的音乐频道，覆盖用户××万，深受广大人民群众喜爱”。

（4）进入正题，如果是音乐频道，那么开始放歌；如果是交通频道，就会开始播路况信息；而文艺频道会跟你大谈古典与美学。

应当说 GSM 的运行步骤与听收音机如出一辙，但是在实现细节上还是有所区别（上下文的黑体字揭示了差异之所在）。前 3 个步骤都是 0 号时隙，也就是控制信道要做的事情，第 4 个步骤是 1～7 号时隙，也就是业务信道要做的事情。我们来看看 GSM 是怎样实现的。

（1）手机自动在整个 GSM 频段上搜索信号，直到它搜到一个“信号非常强的全 0 序列”，就完成了锁定某个载频的过程。这个“信号非常强的全 0 序列”，就是 GSM 里面的频率校正信道（FCCH，Frequency Correction CHannel）。

（2）不管如何，锁定频道之后，手机接下来就需要和 GSM 系统校准时间。广播是不必时时刻刻来跟你校准时间的，因为时间准不准，对你收听广播没有影响，而 GSM 系统是时分复用系统，时间不准整个系统就紊乱了。在 GSM 里面，用来同步的叫做同步信道（SCH，Synchronization CHannel），这个信道会告诉你 TDMA 帧号，你可以根据



TDMA 帧号来核算时间。

（3）不管如何，GSM 的 0 号时隙是一定会跟你打广告的，它会把这个小区还有哪些载频，哪些小区和它相邻，选择这个小区的一些规则以及本小区的手机上行最大发射功率都告诉你。没有办法，如果这些参数不告诉手机，手机就没有办法完成接下来的工作，所以这个广告还必须打。0 号时隙上用来广播这些信息的信道叫做 BCCH 信道。

我们看到了，在 0 号时隙已经有 3 种信道来工作了，分别是 FCCH 信道、SCH 信道、BCCH 信道，就 1 个时隙，怎么样分配给这 3 种信道呢？答案是——轮流来！如图 3.17 所示。

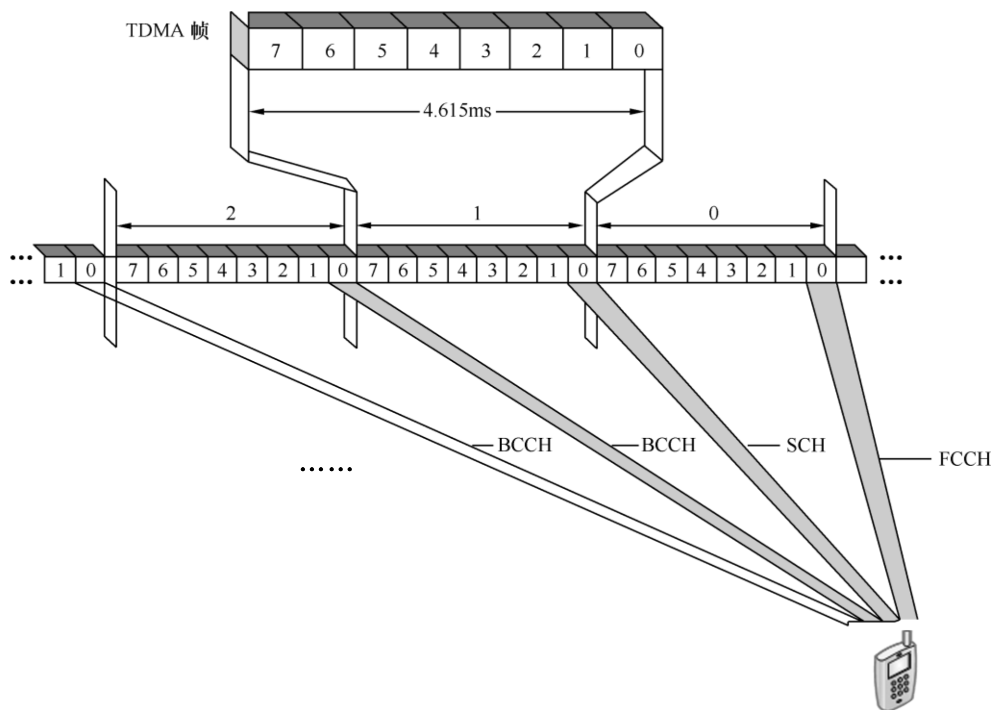


图 3.17　下行 0 号时隙的工作分配

我们看到，在图 3.17 中，FCCH、SCH、BCCH 的数量并不是相等的，因为 BCCH 包含的信息量要大，所以要占用的时间块（标准的说法叫做 TDMA 帧）也多。一般而言，紧随 FCCH 和 SCH 的 BCCH 块要占用连续的 4 个 TDMA 帧。到这里，我们也就可以初步地画出 0 号时隙的 TDMA 帧结构，如图 3.18 所示。

下行 0 号时隙 TDMA 帧结构					
FCCH	SCH	BCCH	BCCH	BCCH	BCCH

图 3.18　下行 0 号时隙 TDMA 帧结构稿 1

到了这里，我们下行 0 号时隙，也就是管理控制时隙的设计是不是就已经很完备了

呢？不是这样的，图 3.18 只能说比较接近现网的情况了，到图 3.18 的时候手机已经可以和 GSM 网络同步并收听广播信息了。但是仅仅做到这两点对于一个系统的运行而言并不够，我们接下来看看还有哪些工作要做。

3.2.2 欲接入，先申请

手机现在和 GSM 网络取得了频率和时间上的同步，也从 BCCH 信道接收了一大堆参数。接下来它是不是可以从 0 号时隙挪开，转到其他时隙上去打电话呢？不是！手机想转到其他时隙上去打电话，必须先跟网络提出申请！为什么要提出申请呢？一是怕资源不够用，二是怕和其他手机有冲突，如果已经有手机占用了 4 号时隙打电话，你冲上去也要占用 4 号时隙，那岂不要打起来。如图 3.19 所示。

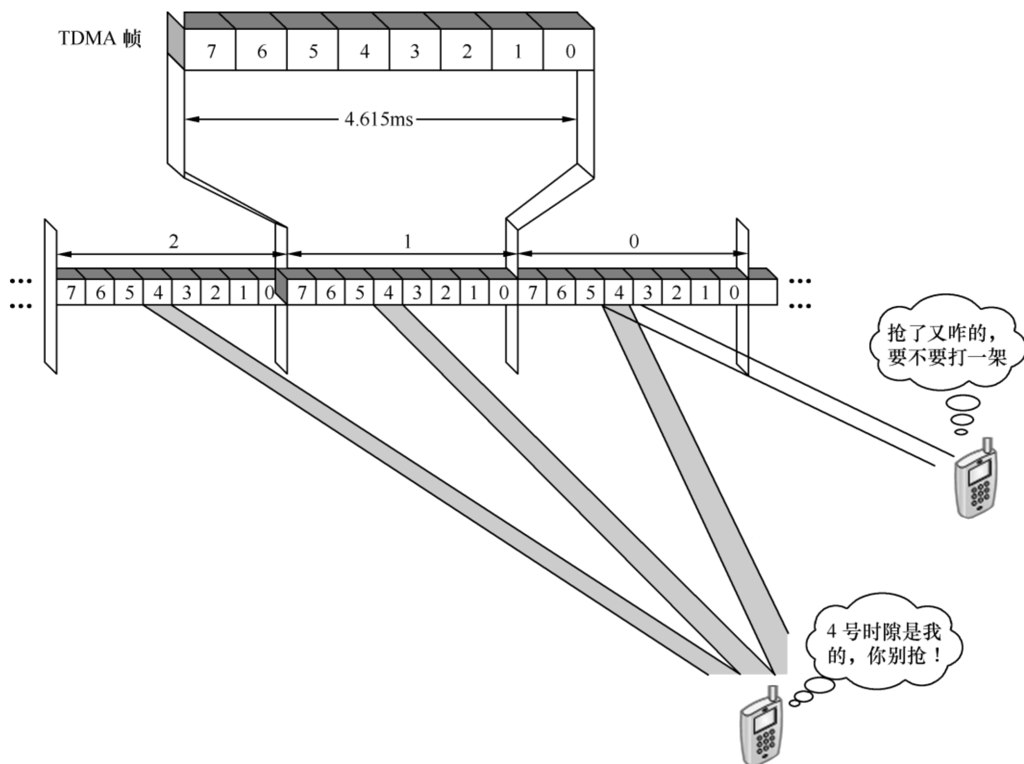


图 3.19 要占用，先申请

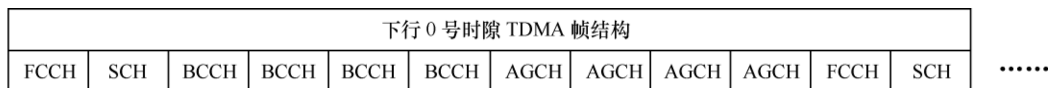
图 3.19 所示局面很混乱，所以手机要打电话，必须先申请时隙资源。所谓手机申请资源，那自然就是手机在上行信道发射申请信号，那么手机应该在上行信道的几号时隙来发送接入申请呢？

因为手机上下行是对称的，下行的 1～7 号时隙用来承载业务，0 号时隙用来管理控



制。那么上行自然也是 1～7 号时隙用来承载业务，0 号时隙用来管理控制。所以手机在上行的 0 号时隙来提出接入申请，占用这个时隙的叫做随机接入信道（RACH，Random Access CHannel）。应该说 RACH 信道是比较幸福的，在上行的 0 号时隙，除了它没别的信道占用，也就是说它是独占的。

相信大家都填过申请表，申请表上有申请栏，也必定会有另一栏与之对应，叫作“批准栏”。没错，手机通过上行信道的 0 号时隙发送了接入申请后，基站也通过下行信道的 0 号时隙发送接入允许信息，这个信息通过允许接入信道（AGCH，Access Grant CHannel）发送。这个信道占用的也是下行信道的 0 号时隙，因此，图 3.18 又做了一点修改，加入了 AGCH 信道，变成了图 3.20 的模样。



下行 0 号时隙 TDMA 帧结构												
FCCH	SCH	BCCH	BCCH	BCCH	BCCH	AGCH	AGCH	AGCH	AGCH	FCCH	SCH	……

图 3.20　下行 0 号时隙 TDMA 帧结构稿 2

我们看到，FCCH 和 SCH 在 TDMA 帧结构中是重复出现的，那是因为 FCCH 和 SCH 是 GSM 系统频率和时间的基准，需要循环往复地播报，确保手机和基站保持频率和时间同步。

3.2.3　欲对话，先寻人

有了 FCCH 和 SCH 信道，时间和频率可以同步了；有了 BCCH 信道，能收听系统的广播消息了；有了 RACH 和 AGCH 信道，可以申请接入和批准接入了。那么这样一来整个 GSM 系统就能运转起来了吗？答案显然是否定的，要和另一个手机用户打电话，必须得知道它的具体位置，要不然信息就传递不过去。而我们在 2.3.2 节中已经讨论过，要知道一个手机的具体位置，除了要知道它所在的 MSC（HLR 中得知），所在的位置区（VLR 中得到），还要对整个位置区内的基站进行广而告之，也就是寻呼，好让手机听到寻呼消息后，自己接入网络。显然，我们在图 3.20 中还遗漏了一种信道，那就是 PCH（Paging CHannel，寻呼信道）。那么我们修改图 3.20，加入寻呼信道，如图 3.21 所示。



下行 0 号时隙 TDMA 帧结构																				
F	S	B	B	B	B	C	C	C	C	F	S	C	C	C	C	C	C	C	C	……

图 3.21　下行 0 号时隙 TDMA 帧结构稿 3

在图 3.21 中，F=FCCH、S=SCH、B=BCCH、C=CCCH。我们看到，在图 3.21 中，AGCH 不见了，刚刚讨论的 PCH 也没有列上来，它们都跑哪里去了？

其实，图 3.21 中的 C 代表了 CCCH（Common Control CHannel），CCCH 也称作公共控制信道。无论 PCH 信道也好，AGCH 信道也罢，都是一个信道对应多个手机，所以

就把它们称为公共控制信道。而 PCH 信道和 AGCH 在下行 0 号时隙并没有固定的数量，可以按照需要进行配置，所以在图 3.21 中，就都用 CCCH 来代替了。

实际上，图 3.21 也不是 GSM 现网中应用的下行 0 号时隙的帧结构，我们在上面只画出了 20 帧，而真正的下行 0 号时隙的帧结构应该是 51 帧，由于上下行是对称的，所以 0 号时隙的上行也是 51 帧，如图 3.22 所示。

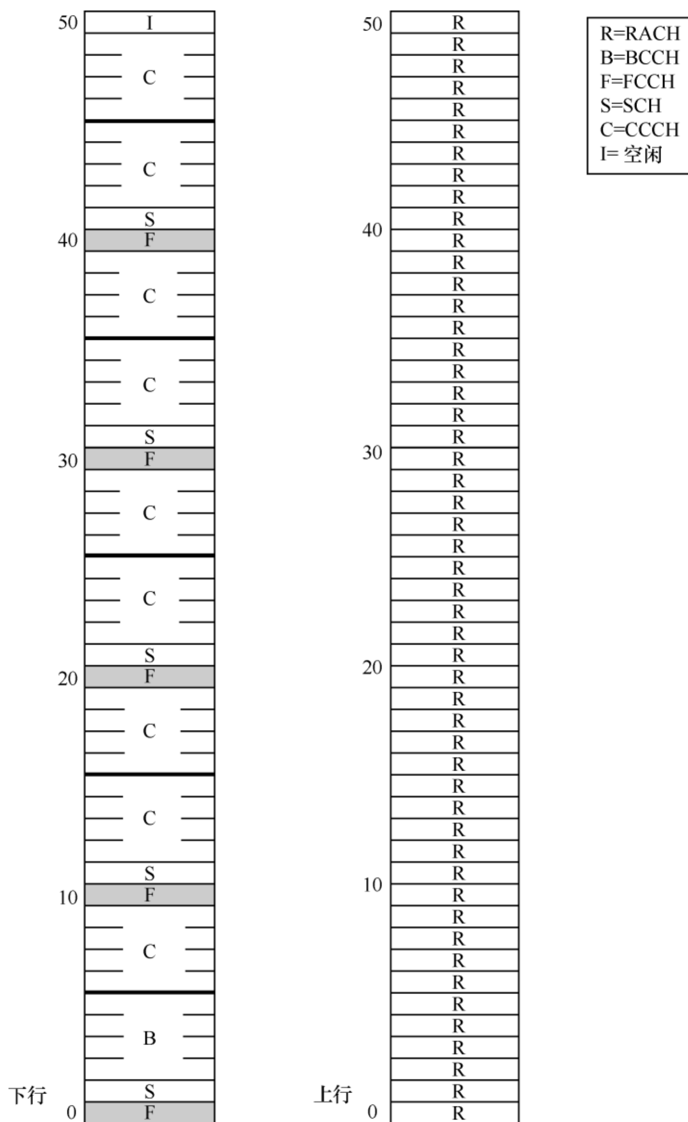


图 3.22　下行“0 号时隙”与上行“0 号时隙”TDMA 帧结构

我们看到，图 3.22 所示的下行“0 号时隙”帧结构与图 3.21 也没有什么大的区别，



只不过是多了几个 CCCH 块（4 个 CCCH 帧算作一个 CCCH 块）。唯一新增的就是 I 帧，即 Idle 帧，空闲帧，此帧不发送任何消息，这个帧的作用别有深意，空出这么一块来是为了腾出手来测试其他小区乃至其他系统的信号强度，好为切换做准备。

而上行信道的 0 号时隙非常简单，全部是 RACH 信道。想想也正常，手机在接入网络之前，除了发送接入请求消息别的的确啥也做不了，所以整个 0 号时隙都被 RACH 信道霸占了。

3.2.4　先寒暄，后长谈

我们在 3.2.2 节中提到，手机要接入网络前，先得在 RACH 信道上发送接入申请，等基站在 AGCH 信道上批准了才能接入网络。如果已经接入了网络，要打电话，那么接下来要占用的就是业务信道（TCH，Traffic CHannel），因为本节中只考虑 1 个小区 1 块载频的情况，所以从 2～7 号时隙（1 号时隙干嘛去了呢？）都是用于 TCH 信道。TCH 的结构如图 3.23 所示。

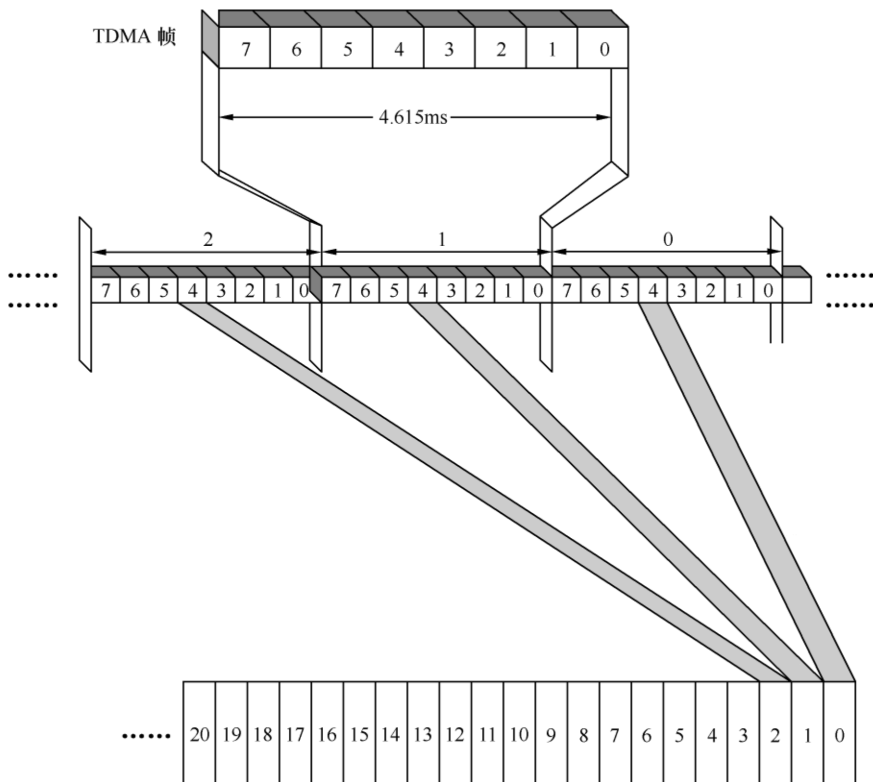


图 3.23　2～7 时隙的 TCH（稿 1）

实际上，手机每次接入的理由不一定就是打电话，它可能是要先传信令（比如鉴权、位置更新等信令），后打电话，由于信令的流量很小，那么传信令的这一段时间单独霸占

一个时隙就没有什么必要。手机接入的理由还可能是发短信，那流程就是先传信令，后发短信，短信的信息量很小，也没有必要独占一个时隙。既然网络有这种小容量信道的需求，那么 SDCCH（Stand-Alone Dedicated Control CHannel，独立专用控制信道）就应运而生了。这种信道盘踞在下行信道的 1 号时隙，可以支持 8 个用户，如图 3.24 所示。

下行信道 1 号时隙的 8 个 SDCCH							
SDCCH1	SDCCH2	SDCCH3	SDCCH4	SDCCH5	SDCCH6	SDCCH7	SDCCH8

图 3.24　1 号时隙的 8 个 SDCCH 用户（鉴权、位置更新、短消息等）

其实不止是大家无聊的时候有收发短消息的需要，在打电话或者开电话会议的时候有些人也喜欢忙里偷闲来发发短信。而此时手机占用的是 2～7 号时隙，那么 1 号时隙的 SDCCH 信道自然是用不上了。于是，就发明了一种信道，这种信道跟 TCH 信道一起共用一个时隙，叫做 SACCH（Slow Associated Control CHannel，慢速随路控制信道）。

我们看看 SACCH 信道的中文名字，叫做慢速随路控制信道。这名字很有意思，为什么叫做慢速呢？看看图 3.25 就明白了。

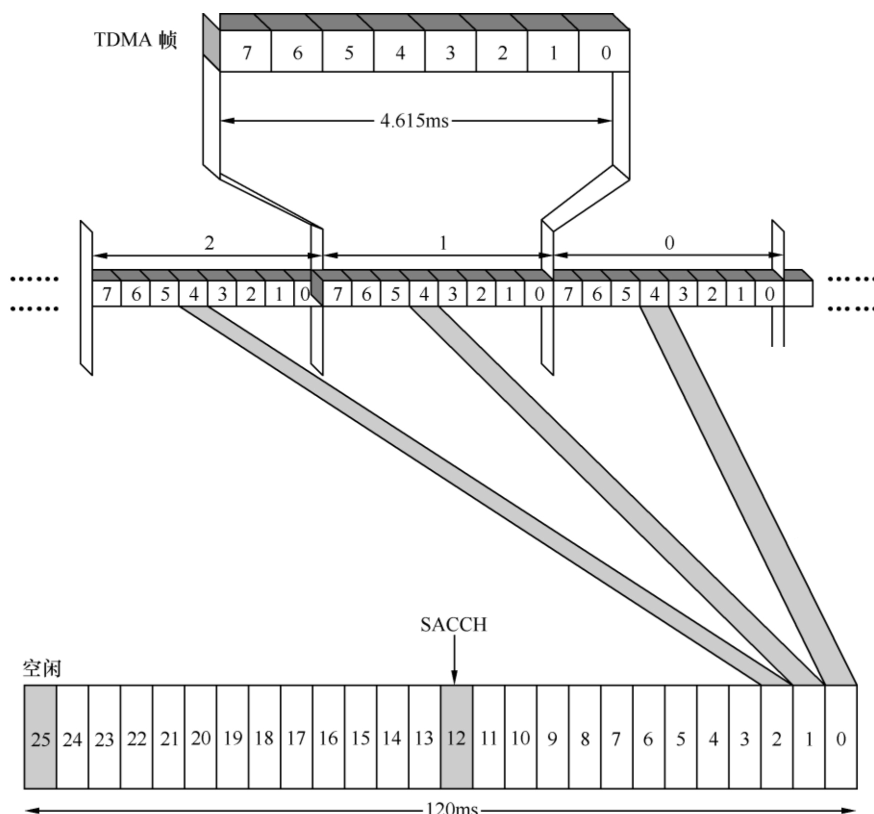


图 3.25　包含了 SACCH 时隙的 TCH 信道



图 3.25 相对图 3.23 增加了一个 SACCH 时隙和一个空闲时隙。SACCH 时隙每 26 帧才出现一次，相当于 4.615ms × 26≈120ms。传递一次消息居然要间隔 120ms，相对 TCH 每 4.615ms 就出现一次自然是慢多了，所以被称作慢速随路信令。应当注意的是，SACCH 信道不单可以传递短消息，还可以传递 LAI、CGI 等消息与信令，这与 SDCCH 信道很相似。

在 3.1 和 3.2 节中，我们分别了解了 GSM 网络的系统结构和空中接口，接下来我们想了解一下 GSM 的演进——GPRS 和 EDGE。

3.3 从邮政到快递公司— 步入信息时代的 GPRS 和 EDGE

从 GSM 到 GPRS、EDGE 的演进有点像这些年邮政的演变。邮政最早只寄平信，随着生产生活的发展也开始经营小包裹、书籍之类的快递业务。而 GPRS 和 EDGE，也可以理解为 GSM 的“快递业务”。

GPRS 和 EDGE 的兴起应当归功于这几年互联网的蓬勃发展。越来越多的人的移动上网需求迫使 GSM 组织必须去考虑如何让 GSM 系统从单一的话音系统转变为能“交换任何信息”的信息交换系统。

GPRS 的引入给图 3.7 所示的 GSM 网络带来了一定的变化，新增了一些设备。但这些新增的设备可以跟 GSM 网络原有的设备对比着去理解和记忆，所以学习起来并不困难，如图 3.26 所示。

GPRS 网络由于要传递 IP 分组数据，连接到 Internet，所以增加了 PCU、SGSN、GGSN 3 种设备。我们看到，在图 3.26 中手机和基站都没有任何改动，但其实用户 A 在 GPRS 网络里还是有变化的，就是 GPRS 网络会给它分配一个 IP 地址，然后空中接口也增加了好几种信道，这在图中没有体现出来。处于 GPRS 状态的手机，你可以把它理解为一台 PC 机，而 GPRS 网络就是公司的内网，需要通过内部网关连接到 Internet 上去。

PCU（Package Control Unit，分组控制单元）与 BSC 部署在一起，它主要的工作就是把分组数据从 GSM 话音数据里分离出来，并传递到 SGSN。

SGSN（Servicing GPRS Support Node，GPRS 服务支持节点），你不妨把它理解为 MSC 的分组版。它的主要工作和 MSC 也几乎一模一样，就是用来对移动台进行鉴权、移动性管理（位置更新）和路由选择，建立到 GGSN 的通道并把数据传递给它。

GGSN（Gateway GPRS Support Node，网关 GPRS 支持节点)，其实它也在 GSM 网络里有对应实体，那就是 GMSC（移动交换关口局），不过为了简单起见，我们在图 3.7

中并没有体现出来。GGSN 实际上是 GPRS 网络对外部数据网络的网关和路由器，它提供 GPRS 和外部分组数据网的互连。GGSN 接收移动台发送的数据，选择到相应的外部网络，或接收外部网络的数据，根据其地址选择 GPRS 网内的传输通道，传输给相应的 SGSN。此外，GGSN 还有地址分配和计费的功能。

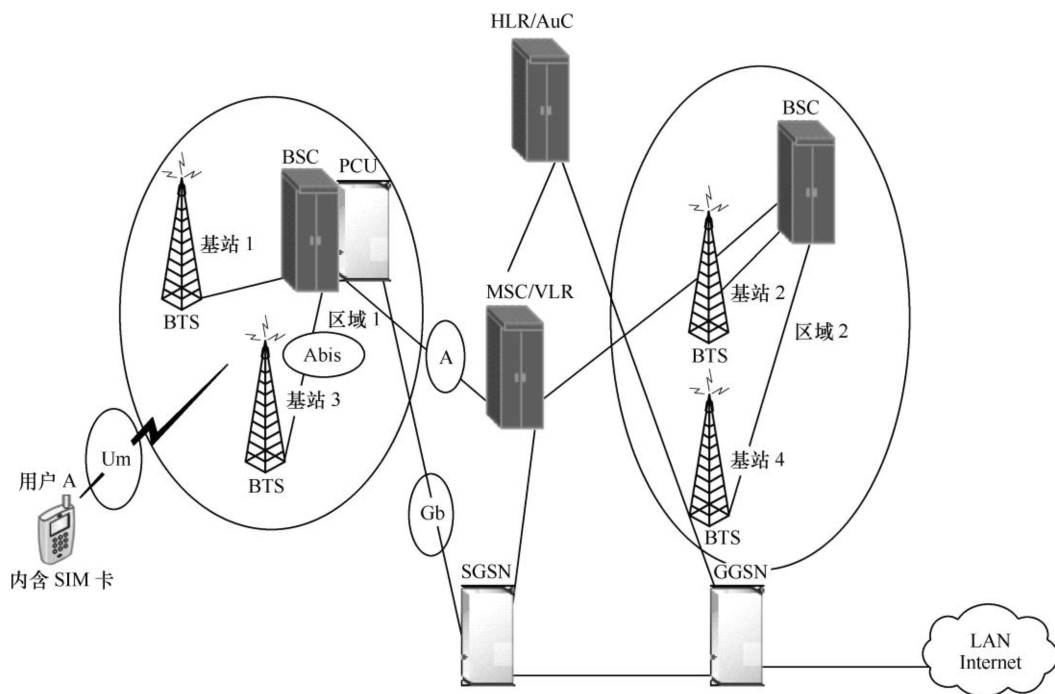


图 3.26　GPRS 网络

请注意咯，这里又增加了一个新的接口，叫做 Gb 接口，属于 PCU 与 SGSN 的接口。后来很多设备商把 PCU 集成到 BSC 里面。Gb 接口就成了 BSC 的分组单元和 SGSN 的接口了。

除此之外，GPRS 网络在空中接口上相对 GSM 网络还引入了一系列的物理信道，如表 3.1 所示。

表 3.1　GPRS 空中接口与 GSM 对照

组　别	名　称	对应 GSM 信道	方　向	功　能
PCCCH	PRACH	RACH	上行	随机接入
	PPCH	PCH	下行	寻呼
	PAGCH	AGCH	下行	允许接入



续表

组　　别	名　　称	对应 GSM 信道	方　　向	功　　能
PBCCH	PBCCH	BCCH	下行	广播
PTCH	PDTCH	TCH	下行和上行	数据
	PACCH	SACCH	下行和上行	随路控制

我们看到，GPRS 网络的空中接口设置与 GSM 网络几乎一模一样，只是前面都加了一个 P，而 P 是 Packet 的意思，说明是分组信道。通常情况下，我们也把承载数据业务的 PDTCH 信道叫做 PDCH 信道。

EDGE 的网络结构和空中接口与 GPRS 基本一致，其最大的区别在于调制方式和编码方式，如图 3.27 所示。

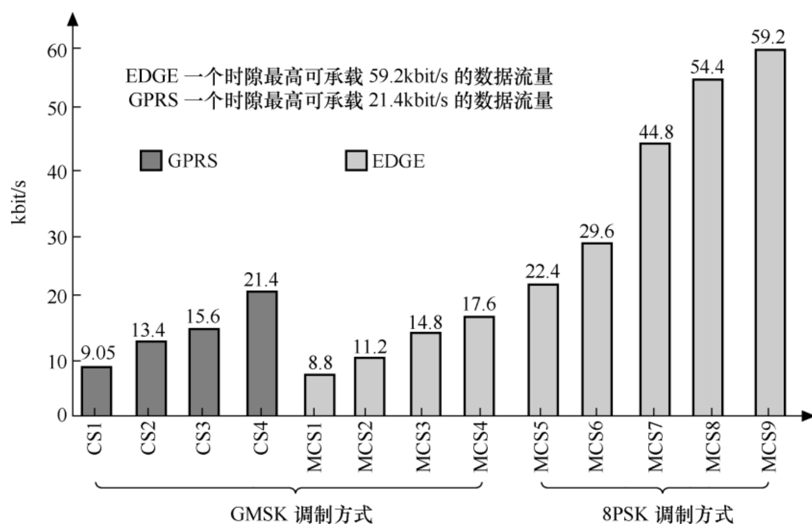


图 3.27　EDGE 与 GPRS 的对比

GPRS 一共有 4 种编码方式，从 CS-1 到 CS-4，当采用 CS-4 时，其峰值速率可以达到 21.4kbit/s。那么我们不难算出 GPRS 的最高理论速率 21.4kbit/s × 8（个时隙）=171.2kbit/s。

GPRS 不管采用哪种编码，都是通过 GMSK 方式调制。

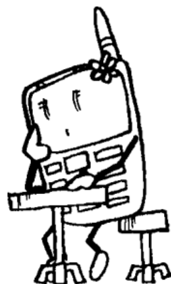
而 EDGE 一共有 9 种编码方式，从 MCS-1 到 MCS-9，当采用 MCS-9 编码时，其峰值速率可以达到 59.2kbit/s。那么我们不难算出 EDGE 的最高理论速率 59.2kbit/s × 8（个时隙）=473.6kbit/s。EDGE 的调制方式与 GPRS 略有不同，当采用 MSC-5 或者更高速率的编码时，需要配合以 8PSK 的调制方式。



到这里为止就为大家展示了 GSM 和 GPRS 的网络结构和空中接口。应当说 GPRS 网络和 EDGE 网络上网都还是挺慢的，其理论上一个手机占满 8 个时隙的峰值速率分别为 171.2kbit/s 和 473.6kbit/s。实际上，现网最多有 4 个时隙给你用，也就是理论速率只有上述的一半。大家上网的时候应该有体验，很慢，不能满足快速上网需求，这也是 3G 产生的一个重要诱因。

第 4 章

Chapter 4



小笨设计的 WCDMA 网络—在云端的物流公司

3G 的最初动力还是源于那个有点遥远的梦想，“任何人”在“任何时间”、“任何地点”和“任何另外一个人”进行“任何方式的信息交换”。前面 4 个“任何”在大哥大时代和 2G 时代已经实现了，而第 5 个“任何”，则一直是人们努力的方向。基于 GSM 的 GPRS、EDGE 和基于 IS-95 的 CDMA 1X 向这个方向靠近了一步，它们可以完成一些低速率的信息交换，比如发彩信、上 WAP 网、聊聊 QQ，但对于视频以及多媒体数据的传输，还是有点力不从心。

其实关于 3G 是否有必要一直都有不同的声音，很多人认为只要能打打电话、发发短信就够了，需要那么高的速率干嘛？然而近几年随着互联网越来越深地渗入我们的生活，随着以 iPhone 和 Android 为代表的智能手机的异军突起，这种怀疑的声音变得越来越少。3G 的用户和业务都在迅速地增长，摩根斯坦利更是发出了这样的惊叹：“移动互联网正在以史无前例的速度在增长！”能让摩根斯坦利这种看惯世间风云的金融大鳄发出这样的感慨，说明移动互联网发展的速度的确超乎想象。现在回过头看那 5 个“任何”，你不得不佩服移动通信的先驱们是如此富有洞见，对未来的趋势把握得这么准确！

在 3G 的 3 大标准中，以 WCDMA 应用最为成熟广泛，而且 3G 的 3 大标准又都以 CDMA 作为空中接口的基础，彼此有很多相似之处。所以在本书中，将以 WCDMA 作为重点来介绍 3G，对于 TD-SCDMA 和 cdma2000，则主要介绍它们和 WCDMA 的区别之所在。

在本章中，有时候可能会用物流来打比方。因为通信和物流其实还是有不少相似之处，不过通信运输的是比特流，物流运输的是货物。通信和物流都需要对有限的承载资源进行合理分配，都需要建立保障机制，确保货物不丢失，都需要有 QoS 保障，服务不

同客户的差别化需求……因为快递和物流是我们熟悉的东西，有时候从它来切入会让问题变得更容易理解。

4.1 小笨的恼人课题— 画一个 WCDMA 网络出来

话说小笨完成了老师布置的课题“设计一个简单的 GSM 网络”以后，长舒了一口气，准备痛痛快快过个假期。哪知道过了几天之后 Outlook 里又收到了老师的邮件，内容如下：“你画的几张图我已经看了，挺好的。你不仅解决了打电话的问题（如图 3.7 所示），而且通过增加处理分组业务的 PCU、SGSN、GGSN 等单元（如图 3.26 所示），实现了上网，聊聊 QQ、MSN 等功能，挺有想法的。不过 GPRS 或者 EDGE 网络上网还是挺慢的，有没有办法改进？同时啊，一个 GSM 的载波只能支持 8 个用户打电话，这也太少了！不如这样，你就设计一张新的网络，来解决支持用户少和下载速率慢的问题，这个网络就叫 WCDMA 网络吧。”

4.1.1 先继承，后创新— WCDMA 的网络结构

又要提高下载速率，又要增加用户数，还要设计一张新的网络。有没有搞错，这不等于说又是一个新的课题吗。小笨心里百般不情愿啊，不过老大都发话了，还能怎样呢？那就动手干吧。小笨想了想，决定先从网络结构入手，因为画个结构图相对什么空中接口啊、帧结构啊、信令流程啊还是要简单很多的，何况这事情他做过一次，做起来比较顺手。

于是，他画出了第一张 WCDMA 网络的草图，如图 4.1 所示。细心的朋友可能发现了，这个图 4.1……它和图 3.26 有啥区别吗，不是抄袭 GPRS 的网络结构吗？这在老师那里能通过吗？

嗯，小笨也发现了这个严重的问题，他觉得一点不改就去忽悠老师非常不妥，于是，他做了几处改动，第一个改动是把基站的名字由“BTS”改成了“Node B”，第二个改动就是把基站控制器的名字由“BSC”改成了“RNC”。然后，他把原来的“Um”口改成了“Uu”口，“Abis”口改成了“Iub”口，“A”接口改成了“Iu-CS”接口，“Gb”接口改成了“Iu-PS”接口。于是，一个崭新的 WCDMA 网络出炉了，如图 4.2 所示。

看起来是不是很匪夷所思，图 4.2 中的 WCDMA 网络跟 GSM 网络怎么是一样的呢？其实，图 4.2 就是 WCDMA 的最初版本 R99，之所以保持几乎完全一致的结构是为了向下兼容，从而降低 3G 网络的建网成本。TD-SCDMA 网络和 cdma2000 网络也有同样的考虑。



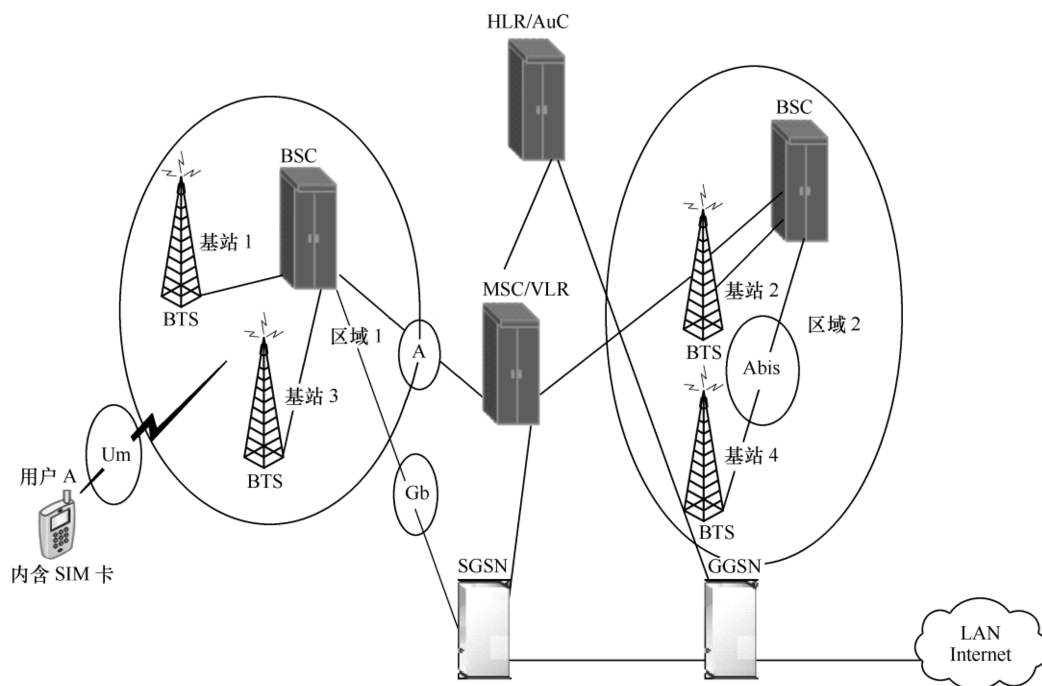


图 4.1　WCDMA 网络草图 1

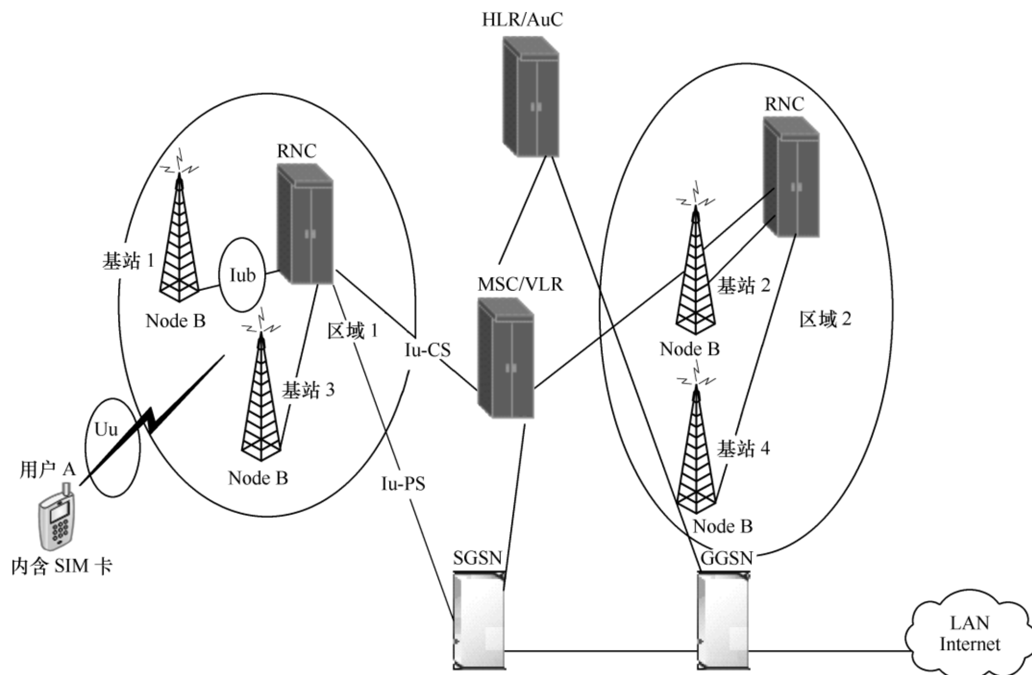


图 4.2　WCDMA 网络草图 2（R99 版本）

小笨是这样描述WCDMA网络的："图4.2中的RNC功能和GSM中的BSC基本一致，也是负责功率控制、分配和管理无线资源。而Node B的功能与BTS也一致，负责编码解码调制解调这些无线通信基础工作。原来的Um空中接口，BTS和BSC之间的Abis接口，BSC和MSC之间的A接口，BSC和SGSN之间的Gb接口分别改名为Uu接口、Iub接口、Iu-CS接口和Iu-PS接口，作用基本不变"。

乍一看，WCDMA和GSM相比，除了几个设备的名字改了改，几个接口的名字变了变，其余的基本没有变化。这也很好理解，你看计算机的世界里遵从的是摩尔定律，每一年半刷新一次。以前的386变成现在的双核高性能计算机，发展不可谓不迅速，变化不可谓不迅猛，可是CPU、内存、显存、硬盘的主体架构不还是没多少改动，所以说基本架构这种东西是最难改变的。

那么WCDMA相对GSM而言，最大的变化发生在哪里呢？答案是空中接口，那岂止是变化，完全是一场彻底的革命！

4.1.2 源自泰勒管理— 分层服务

在对空中接口的结构进行详细研究之前，我想我们有必要对OSI 7层模型进行一下简单的描述。应当说，现代管理学很多内容都源自于科学管理之父弗雷德里克·温斯洛·泰勒。泰勒的管理学精髓概括起来无非两条——其一是进行**分工**，每个人只专注于自己那一块事情，这样可以做到熟能生巧，提高效率；其二是**标准化**，每个岗位上都有标准动作，而每个岗位和其他岗位的衔接都有标准规范，不管这个岗位的具体内容怎么变，只要和其他岗位衔接的内容（也即接口）没什么变化，那么对其他岗位就没有多少影响。

泰勒的思想不仅深深地影响了制造业，而且逐渐发散到各个行业。近20年以来，流水线生产方式被深刻理解，各行各业都争相引入流水线生产方式。以软件开发为例，20年前做软件开发，就是程序员单枪匹马去编码、编译和调试。随着软件工程得以应用，软件开发细化为架构设计、软件编码和测试等几个部分，软件开发可以采用工厂化的流水线生产方式来进行。用流水线方式生产软件与软件工程师单打独斗编程相比，能够发挥规模经济的优势，使得软件开发成本大幅度下降。

在通信里面，就充分体现了这种"分工"和"标准化"的精神，典型案例就是OSI 7层模型。OSI 7层模型从上到下分别是：应用层、表达层、会话层、传输层、网络层、数据链路层和物理层，每层都有自己的功能，如图4.3所示。其中通信系统通常位于最底层的3层结构中，即网络层、数据链路层和物理层。因此，我们来讨论空中接口的时候也主要关注这3层。

其中，网络层的主要任务是保证网络内任意设备之间连接的可靠性传递，也就是"一点到任何一点"的可靠连接。具体到WCDMA空中接口，也就是保证端到端的业务的顺



利进行。

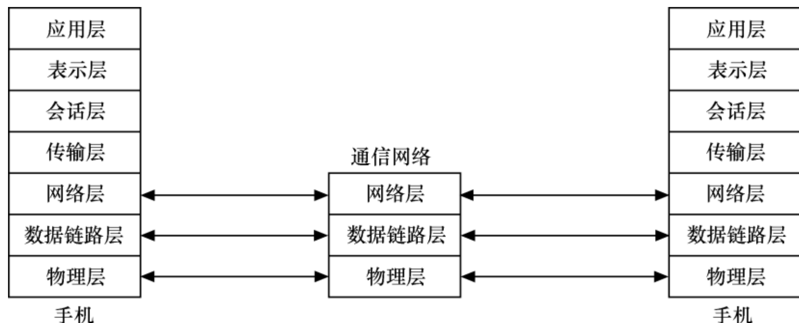


图 4.3　OSI 7 层模型

数据链路层的主要任务是保证设备之间点到点连接的可靠传递，也就是“一点到下一点”可靠连接。具体到 WCDMA 空中接口，其工作就是要保证 UTRAN 网络到 UE 之间的可靠连接。数据链路层和网络层的工作是紧密相关的，如果数据链路层评估两点之间的一条路径已经无法保证通信质量的时候，那么网络层就会考虑寻找这两点之间的其他通路来代替。

物理层的主要任务是建立设备之间的物理连接。在 WCDMA 空中接口中，其主要工作就是要把比特流映射到电磁波上，然后通过天线发射出去；同时从天线处接收电磁波信号，转换为相应的比特数据。

4.2　少年 WCDMA 之烦恼——　我有哪些资源

我们在 2.2.1 节中就已经讨论过，对于无线通信而言，最烦恼的事情莫过于同频段的电磁波在空中会互相干扰。这和有线通信的信号都在电缆或者光缆里传输，彼此之间不会造成干扰有了本质的不同。这种同频段自干扰的特性形成了空中接口的资源的有限性，从而制约了能够接入的用户数或者用户接入后的传输速率，这也成了运营商最大的心病。所以历次无线通信的革命性技术出现，几乎都是空中接口的革命。比如从 GSM 到 3G，空中接口由 FDMA、TDMA 变成了 CDMA。而从 3G 到其后续演进 LTE，OFDM 技术又取代了 CDMA。在看下面的内容之前，建议大家先回顾一下 2.2.1 节和 2.2.2 节，好对接下来的内容有更好的理解。

在小笨的不懈努力下，一个所谓的“WCDMA”网络终于呱呱落地了。但小笨心里并不轻松，因为导师要求的两个改进“容纳更多用户”和“更高上网速率”一个也没实现。改下名字不过是新瓶装旧酒，没有什么实质性的作用。那么该从哪里入手呢？原来

网络的“瓶颈”究竟在哪里呢？

小笨在通信的世界里摸爬滚打很多年，他扫了一眼图 4.2，他觉得 Iub 接口、Iu-CS 口、Iu-PS 口都是地面接口，都是用电缆或者光纤连起来的，在这里信号的传播路径被控制得好好的，不会出现那讨厌的同频干扰，因此“瓶颈”断然不会在这里。那么变革的关键想都不用想，就在 Uu 口——空中接口！

4.2.1　容量一　移动通信的“阿喀琉斯之踵”

我们在 2.1.4 节中讨论过，还在“贝尔移动系统”那会，不能容纳更多的用户就成了移动通信的“阿喀琉斯之踵”，也是运营商心中的隐痛。到了 GSM 时代，通过 FDMA、TDMA 以及频率复用技术，能够容纳更多用户通话这个问题基本得到了解决。中国移动的 GSM 用户都已经有 5.5 亿了，也没见到网络瘫痪，足以见得 GSM 网络的成熟。

但是运营商们依然可以感觉不满，理由也很充分。GSM 有两大软肋，一是单个载波最多才 8 个时隙，才能承载 8 个话音用户，如果想承载更多的用户，那对不起，请扩容你的载波。第二是传输数据业务的速率也太慢了，采用 GPRS 时，手机捆绑 4 个时隙最大理论峰值速率为 21.4kbit/s × 4 = 85.6kbit/s（采用 CS-4 编码、GMSK 调制）；采用 EDGE 的时候，手机捆绑 4 个时隙最大理论峰值速率为 59.2kbit/s × 4 = 236.8kbit/s（采用 MCS-9 编码、8PSK 调制）。捆绑更多时隙的手机？对不起，还没有做出来，所以手机的峰值速率跟一个载波能承载的最大峰值速率还是有区别的。一个载波能承载的最大峰值速率一般按 8 个时隙算。所以我们经常听到 GPRS 最大峰值速率为 171.2kbit/s，EDGE 的峰值速率最大为 473.6kbit/s，这实际上就是一个载波能承载的最高速率。各位还得注意“理论”、“峰值”这两个词，这意味着现网应用中还要打不少的折扣。而蜗牛一般的手机上网速度，跟运营商往信息化方向转型的战略是相悖的，运营商想卖更多信息，前提是这些信息在管道里的传输速率够快，如果太慢了，大家就没有兴趣用。

小笨很快意识到，导师提到的 GSM 的两个问题“单个载波只能容纳 8 个用户，太少”和“单个载波上网最大峰值速率只有 473.6kbit/s，太慢”这两个问题其实质是一个问题。为什么这样说呢？因为每个话音用户其话音比特流的速率是恒定的，如果一个载波能承载的比特速率有限，那么自然承载的话音用户就不会多。

那么，GSM 只能承载 8 个用户的“罪魁祸首”到底是谁呢？答案就是那 200kHz 的带宽！

请大家把书翻到 1.6.2 节，来看看那著名的香农定理：

$$C = B\,\mathrm{lb}\left(1+\frac{S}{N}\right)$$

香农定理清楚地告诉我们，要想传输速率 C 提高，要么你提高你的带宽 B，要么你



提高你的信噪比 S/N。提高信噪比往往意味着提高发射功率和降低噪声，这能做的工作比较有限。所以在 UMTS 和 LTE 中，一想到提高峰值速率，首先做的都是占用更多的带宽资源。

小笨清楚地看到了这一点，他决定不管空中接口采用什么多址技术，首要问题就是先把带宽增大，因为根据香农定理，带宽上不去，其他干什么都是白搭。于是，他选择了一个数“5MHz”。（嗯，没错，WCDMA 一个载波的带宽就是 5MHz。）

一个载波的带宽选定了，接下来就是空中接口最核心的问题，采用怎样的多址技术？多址技术这个词听起来很绕口，其实质就是“怎样把空中接口的资源合理分配给用户，从而让更多的用户接入或者使已经接入的用户达到更高的速率”。

空中接口有哪些资源呢？在我们通常的想法中，应该是两个维度，即频率资源和时间资源。GSM 就是在这两个方面做了很多事情，首先是进行频分复用，ITU 给了它 25MHz 的带宽，于是他从频率上竖切一刀，把这 25MHz 切成 200kHz 一块，每一块对应一个载波，可以支持一个用户；后来它觉得一个载波只能支持一个用户实在是太亏了，又从时间上横切了一刀，把时间资源切成了 8 块，这样一个载波就能支持 8 个用户了。

小笨不想再沿袭 GSM 的老路了，因为 5MHz 带宽是不能再继续往下切片了，往下切成一小块一小块的，香农定理就会告诉你，带宽小，速率必然小，这就跟设计这个系统的初衷相违背了。他也不想进行时分，时分的话支持多少个用户就要把时间切成多少片，支持很多的用户就意味着时间片要切得很细，这么狭窄的时间片要做到用户彼此之间时间不交叠、不打架实在不是一件容易的事情。

小笨有了一个大胆的想法，他觉得所有用户在同一个频段同一个时间进行通信也没有什么问题，只要它们之间能够用不同的扩频码来区别就行了。（参见 2.2.2 节，那一节里说明了两个问题：①如何用扩频码来区分不同的用户；②当用户 A 的信号去干扰用户 B 时，用户 B 怎样通过解扩的过程把用户 A 的干扰消于无形。）

问题是扩频码并不好找，它需要满足两个特点：一是正交（完全没有什么相关性），这是显而易见的，如果不同的扩频码之间不正交，那么用户之间就无法进行区分了；第二是长度可变，这又是为什么呢？长度可变意味着速率可变，这个道理待会大家就明白了。小笨翻遍各种书籍，终于发现有一个叫 Walsh 的数学家已经发明了这种序列矩阵，不但正交，而且长度可以变化，非常强大！这种码也叫做 OVSF 码，即正交扩频因子，如图 4.4 所示。

大家可以看到，同一阶数的扩频码都是正交的，比如 $C_{2,1}$ 和 $C_{2,2}$ 就是正交的，$C_{4,1}$、$C_{4,2}$、$C_{4,3}$、$C_{4,4}$ 之间也是相互正交的。不同阶数的序列，比如 $C_{4,x}$ 和 $C_{2,y}$ 就要看具体属于哪个码树了，同一个码树下的并不相互正交，比如 $C_{4,2}$，因为是 $C_{2,1}$ 衍生出来的，所以和 $C_{2,1}$ 混着用就会产生干扰，而 $C_{4,3}$ 由于是 $C_{2,2}$ 衍生出来的，所以和 $C_{2,1}$ 还是正交的。



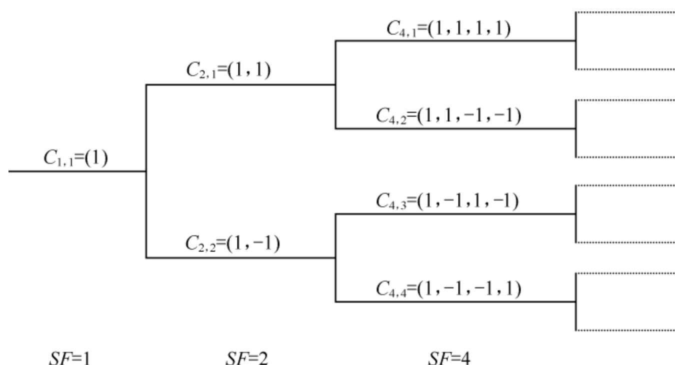


图 4.4　WCDMA 空中接口采用的 OVSF 扩频码

小笨把图 4.4 所示的码树一直扩充到了 512 阶，不同的用户、不同的信号占用不同的码字。当一个用户选取扩频码的时候，只要这个扩频码的上一级码树上没有码字被占用，下一级也没有码字被占用就可以使用。上面这句话看上去有点不够直观，我们不妨放到图 4.4 中来具体看一下。假如用户 A 想用 $C_{4,4}$ 作为自己的扩频码，那么 $C_{4,3}$ 被人占了没关系，因为 $C_{4,4}$ 和 $C_{4,3}$ 正交，$C_{2,1}$ 被人占了也没有关系，因为 $C_{4,4}$ 和它也正交。只要 $C_{2,1}$ 以及它的下一级码树比如 $C_{8,5}$ 不要被占了就没有关系。$C_{8,5}$ 在图中没有画出来，大家可以自行画一下。

大家看到这里或许要好奇了，小笨为什么要搞一个数字从小到大的码树，而不是直接截取第 512 阶那 512 个码字。那 512 个码字都是相互正交的，来得多直接多简单。就不用像现在这样，一个用户想选个扩频码还要看看这条分支上下游的码字有没有被占用掉，岂不是省心很多？别急，这个问题且让小笨慢慢道来。

1．比特、符号、码片

大家知道，话音信号经过信源编码和信道编码就形成了一串串二进制数字，这就是我们常说的“**比特**”。比特经过基带调制（GMSK、QPSK 或 16QAM）就成了“**符号**”。一个符号可以对应两个比特，比如 QPSK；一个符号也可以对应 4 个比特，比如 16QAM。如果是 GSM，故事到这里也就结束了。如图 4.5 所示。

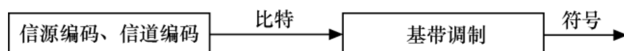


图 4.5　编码与基带调制

图 4.5 展示的就是一个“窄带”信号，窄带和宽带是相对来说的。比如 GSM，它的带宽只有 200kHz，相对于 5MHz 的 WCDMA 而言就是窄带。窄带信号的特点是速率不高，而且要独占一个频带。小笨从 2.2.2 节中吸取了经验，他知道频带是可以让所有用



户共享的，不需要独占，只需要合适的码来区分就可以了。而这种码著名的数学家 Walsh 已经给出来了，那就是 OVSF 码。所以，在 CDMA 技术中（WCDMA、cdma2000、TD-SCDMA 均是如此）又多了一个步骤，那就是要拿基带调制后的信号与 OVSF 码相乘，又得到了一个新的信号，称之为“**码片**”！如图 4.6 所示。

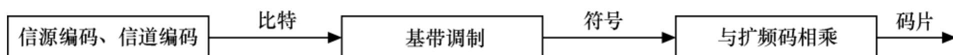


图 4.6　码片

2. 扩频、码片速率、扩频因子

话说到这里，小笨想一定还有读者没有明白 OVSF 码为什么叫做扩频码。因为从上述来看，它展现的特点不过是不同的 OVSF 码之间可以正交而已，叫 OF（Orthogonal Factor，正交因子）码岂不很好吗？为什么要叫做扩频码呢？

那是因为 OVSF 码传输速率远远高于基带信号的传输速率，比如一个话音信号编码之后，速率可能是 30kbit/s。但是 OVSF 码的速率达到了 3.84Mchip/s。两者一相乘之后原有信号的速率也上去了，所需要的频谱带宽同时也增加了。所谓“**扩频**”，就是通过信号相乘，扩展了原有信号的频谱带宽的意思，大家看 2.2.2 节中的图 2.15 就能得出比较直观的认识，在那个图中，带宽是扩展了 8 倍。**在 WCDMA 中，OVSF 码的速率是恒定的，为 3.84chip/s，也称之为码片速率**。大家注意了，我们使用速率单位都是很考究的，比特速率是 bit/s，符号速率是 symbol/s，码片速率是 chip/s。

那么一个信号和扩频码相乘其带宽到底扩展几倍呢？这就是“**扩频因子**”的用处了，大家看图 4.4，扩频因子有 1、2、4、8…256、512 之分，都是 2 的倍数。当 $SF = 2$ 时，一个原始信号位与 2 个码片相乘，频带扩展 2 倍；当 $SF = 4$ 时，一个原始信号位与 4 个码片相乘，频带扩展 4 倍……关于这一点，大家还是可以翻到 2.2.2 节，看看图 2.15，会有更直观的认识。

现在，我们终于可以把 OVSF 码的英文全称又翻出来看一遍了，小笨想到现在为止我们终于可以完整地解读这个单词了——Orthogonal Variable Spreading Factor，正交可变扩频因子。

不同的 OVSF 互不相关，此所谓正交；有 $SF = 1$、2…256、512 等多种选择，此所谓可变；码片速率高于原始信号速率，相乘后频带延展，此所谓扩频。这就是正交可变扩频因子的完全解读。

3. 扩频有啥好处

俗话说无利不起早，在 GSM 已经蔚然成型之后，高通公司硬是凭着 CDMA 杀出了

一条血路，并让 CDMA 成了 3 大 3G 标准空中接口的基础，高通也因此获誉“一流的企业做标准”。能在如此条件下取得如此不俗的成绩，说明扩频这个玩意，一定有它独特的价值之所在。

应当说高通当初这样做是很令人匪夷所思的，很长时间都得不到人们的理解。空中接口的频谱资源是非常宝贵的，传统的无线通信，人们总是想方设法使信号所占的频谱尽量地窄，以便充分利用稀缺的频谱资源。高通却反其道而行之，通过“扩频”，一个信号就要占用很宽的频谱，为什么要这样做呢？

答案还是源于伟大的香农定理，让我们来温习一下：

$$C = B\,\mathrm{lb}\left(1+\frac{S}{N}\right)$$

在这里，C 表示信道容量，单位为 bit/s；B 表示信号频带宽度，单位为 Hz；S 表示信号平均功率，单位为 W；N 表示噪声平均功率，单位为 W。

香农公式指出，如果信道容量 C 不变（也即传输速率不变），则信号带宽 B 和信噪比 S/N 是可以互换的。只要增加信号带宽，就可以在较低的信噪比情况下，以相同的信息速率来可靠地传输信息。甚至在信号远小于噪声，完全被噪声淹没的情况下，只要相应地增加信号带宽，仍然能保持可靠的通信。也就是说，可以用扩频的方法以更高的带宽传输信息来换取信噪比上的好处。

由于扩频通信具有抗干扰和噪声能力强，发射功率小，可以湮没于噪声之中实现隐蔽，很难被发现和截获的特点，使得它广泛应用于军事通信。

小笨思前想后，觉得这个宽带扩频码分多址技术（WCDMA, Wideband Code Division Multiple Access）既能有效区分用户，又具有发射功率低、抗干扰和噪声能力强、保密性好的特点，于是，就决定采用这个多址技术来给用户分配资源了！

他给每个基站分配了一棵 OVSF 码树，不同的用户可以占用这棵码树上不同的码；他给每个手机也分配了一棵 OVSF 码树，手机的不同业务（比如话音通话和上网）可以占用码树上不同的码。如此，就实现了对空中接口码资源的分配。

4.2.2 码分多址的胜负手— 功率控制与软切换

小笨把空中接口的设计思路拿给导师过目，导师看了大为赞赏。空中接口本来就是无线通信中最复杂的部分，小笨居然从电影演员海蒂·拉玛和高通公司的雅各布那里吸取到了灵感，设计出来这么一个多址方式，实属难得，真是孺子可教也。导师转念一想，决定把刚投奔门下的新同学鲁小新交给小笨，让小笨带着一起做设计。

小笨得到了老师的赞扬，心里不由得扬扬得意，自以为方案做得天衣无缝，接下来的仿真验证也懒得做了，全权交给小新去打理。小新初来乍到就得到了独当一面的机会，



对小笨的偷懒行为也并无怨言，喜滋滋地做验证去了。

1. 远近效应

话说这几天小笨日日笙歌，夜夜魔兽，好不快活。有一天正在打 DOTA，激战正酣之时，突然小新跑了进来，大喊："不好啦，验证出问题啦，你设计的系统根本打不了电话。导师怪你糊弄他，非常恼怒，打算直接挂掉你的毕业设计！"

小笨一听从座位上蹭地一下蹿了起来，挨骂还好，毕业设计挂了可不是好玩的。于是他立即跑到实验室，跟小新一起看出了什么问题。小新拿出仿真场景给小笨看，如图 4.7 所示。

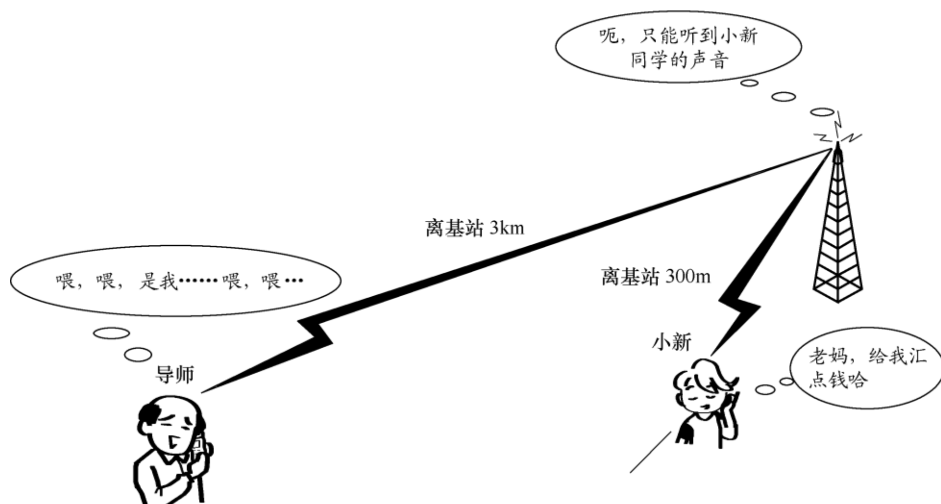


图 4.7　CDMA 中的远近效应

"事情是这样的，我在离基站 300m 的地方给我妈打电话，声音清晰，一点问题也没有；导师在离基站 3km 左右的地方给他老婆打电话，却死活打不通。"小新接着又说："我又和老师换了个位置，这次他离基站近我离基站远，结果是他能打电话我不能打电话了。导师就觉得一定是你这系统有问题，你要改不好这毕业设计就别想过了"。

小笨听得头皮发麻，乍一看他也想不出个所以然来，因为 WCDMA 的基站模样长得跟 GSM 也差不多，没听说过 GSM 有离基站近的在打电话离基站远的就打不了电话了的情况，这是怎么回事呢？

小笨和小新都看着图 4.7 的场景，默默思索，半天都没有说话。还是小新脑袋比较灵光，他试探着跟小笨商量："我看问题是不是这样，假设现在有学生 A 和学生 B 在教室里，学生 A 坐第一排，学生 B 坐最后一排。现在学生 A 和学生 B 同时向老师大声说话，那么由于学生 B 离得太远，老师势必听不清楚他说话而只能听得到学生 A 说话，我



们不妨把这个问题就叫做‘远近效应’吧，场景如图 4.8 所示”。

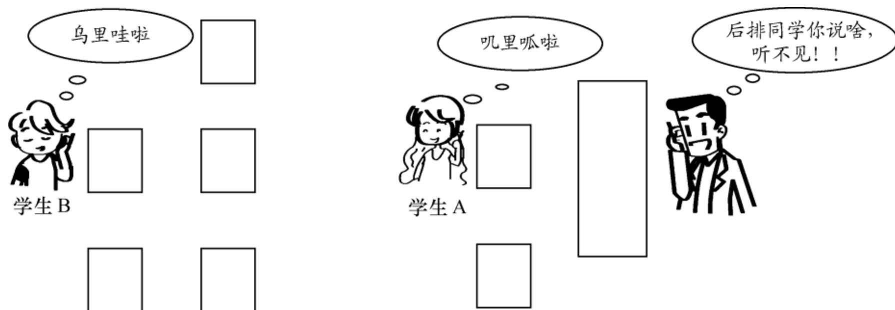


图 4.8　课堂里的远近效应

小新对自己这个想法颇有点自鸣得意，但又觉得有点不对：“虽然与图 4.8 里的场景挺像的，但是以前的无线通信，比如 GSM 里可从来没有听说过什么远近效应啊，为什么到了 CDMA 里会出现这么个问题呢？”

小笨倒腾过 GSM，他立即发现了问题之所在：“GSM 是通过频分和时分来区分用户的，距离远的和距离近的信号运行在不同的时间和频率里，是不会互相干扰的。而 CDMA 是在同一个频段上，因此，离基站近的手机嗓门太大，就把离得远的手机的信号给湮没了。”

小新皱了皱眉头：“不对吧，CDMA 的用户不是可以用 OVSF 码来区分么，怎么又会信号强的干扰信号弱的呢？”

小笨微微一笑，指了指 OVSF 码树的分配方案：“你看，你和导师都是用的同一个基站的下行信号，下行信号是不存在问题的，因为下行信号是一个基站发出的，采用的是同一棵码树的不同 OVSF 码，不会互相干扰。比如说导师用 $C_{4,1}$ 的码字，你用 $C_{4,2}$ 的码字，当然没有问题。而上行，这里是两个手机，每个手机都有一棵码树，那么它们完全就可能采用相同的码字。比如导师在用 $C_{4,1}$ 的码字进行上行信号传输，你也在用 $C_{4,1}$ 的码字进行上行信号的传输，同一个频段同一个码字，不干扰才怪呢！即使码字不同，解码也是需要一定的信噪比才能解得出来的，你离基站这么近，当然就把导师的信号彻底给湮没了。看来在 WCDMA 里面，上行和下行还真不是一回事，上行要多考虑下自干扰的问题。”

小新转念一想，提出来一个解决办法：“在图 4.8 中，老师如果想听清楚学生 B 的讲话，那么只有要求学生 A 放低声音，学生 B 提高声音，等学生 B 的声音比学生 A 大一些，大到刚好可以弥补从教室后面到前面的音量损耗就可以了。对于老师而言，听到的两个学生的声音最好可以一样大，这样谁都不会盖住谁，就是最佳效果，如图 4.9 所示。那么以此类推，只要基站有控制手机发射功率的能力，那么‘远近效应’问题也可以



迎刃而解。”

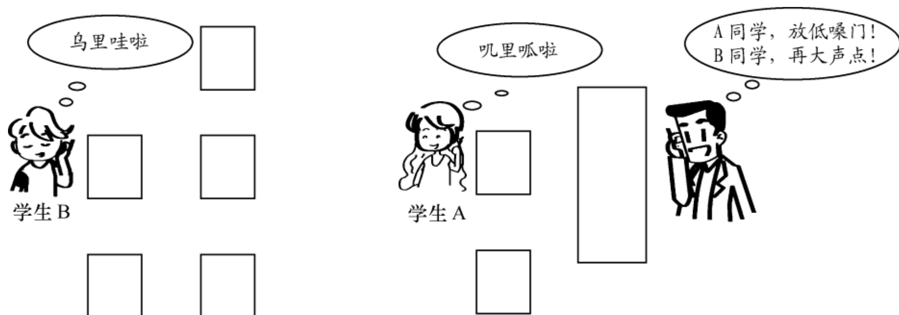


图 4.9　老师通过控制学生 A 和学生 B 的音量来防止“远近效应”

小新觉得自己的解决方案很有参考价值，但是他有一点还没有想明白：“老师听不听得清楚凭耳朵和大脑的直觉来衡量。那么基站能否听清楚该用什么标准来衡量呢，是不是单单用接收信号的功率这个标准就可以呢？”小笨觉得这算不了什么大问题：“听不听得清楚不仅跟接收功率有关，而且跟噪声也有关系，基站应该用信噪比 C/I 来衡量信号的质量吧。就这么来打比方吧，平时你给你女朋友打电话，你在安静的环境中给她打，可能她只需要很小的声音你就能听得清楚。当你处在超市或者公交车这种很嘈杂的环境下，你大概就听不清楚了，你可能经常要求她大点声，再大点声。这就是因为环境噪声变大了，我觉得图 4.9 这种方案完全可行，只是我们要把基站‘听得清’的标准用 C/I 来衡量就可以了，这比光用接收功率来衡量来得科学，方案如图 4.10 所示”。

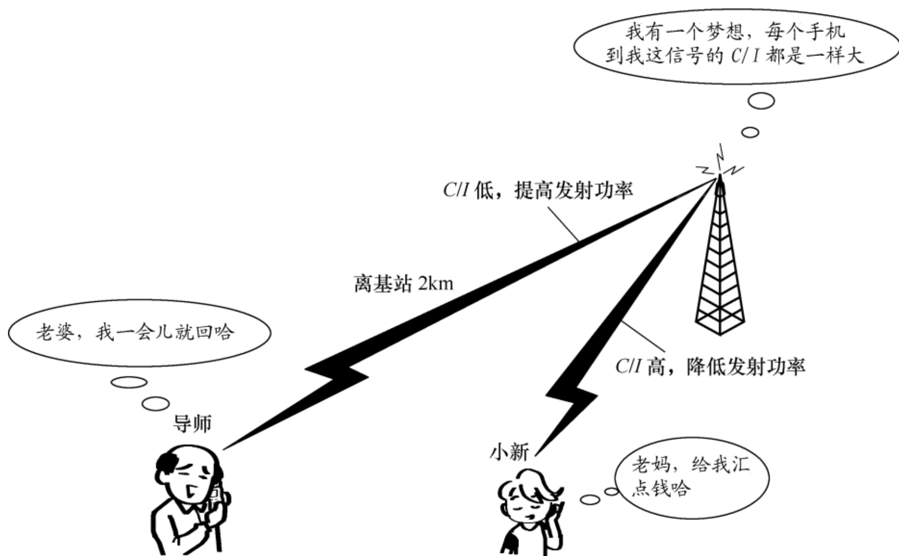


图 4.10　通过功率控制防止出现“远近效应”

在 GSM 中，也有功率控制，不过 GSM 的功率控制的作用主要是以下两个：一来通过提升功率防止单条链路的信号质量过差；二来降低功率来减少终端的耗电和整个网络的电磁噪声。在 CDMA 中，虽然也有以上两方面的考虑，但由于码分多址这种用户信号都在同一个频段上运行的特殊性质，所以其功率控制最重要的作用还是防止远近效应。试想一下，如果只有离基站最近的那个用户可以打电话，那么这整个无线通信网络还有什么作用呢？

WCDMA 的功率控制有个特点，就是速度非常快。GSM 的功率控制每秒只能进行 2 次，而 WCDMA 的功率控制每秒可以有 1 500 次。其机理与两者的帧结构有关，在这里不展开深入讨论。这样高频率的功率控制使得 WCDMA 可以应对快衰落的挑战。我们可以从图 4.11 中看看 WCDMA 的功率控制是如何克服快衰落的。

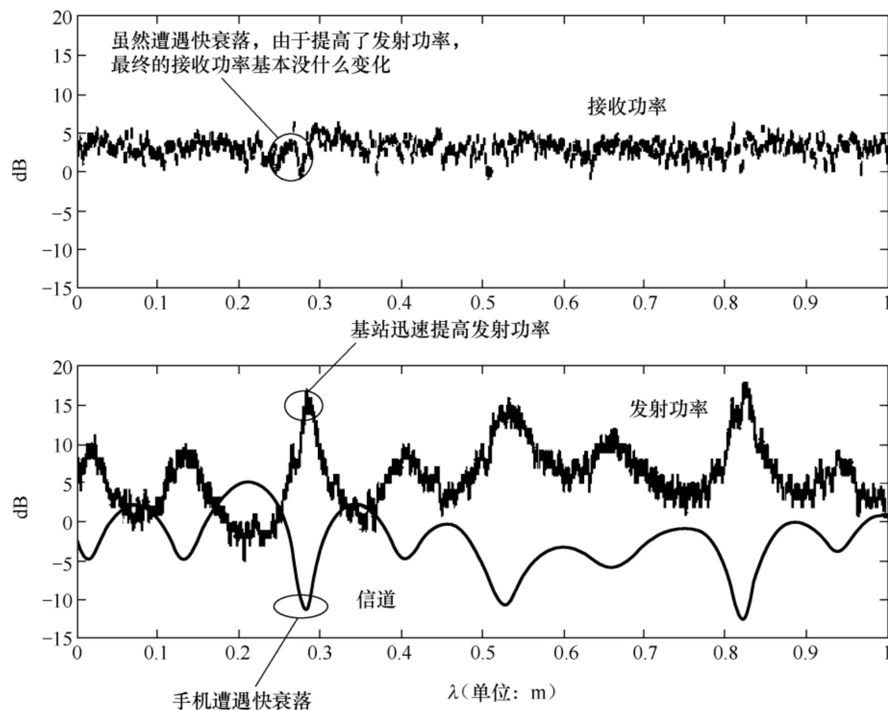


图 4.11　WCDMA 通过快速功率控制来抗衡快衰落

2. 软切换

小笨和小新费尽力气才解决“远近效应”的麻烦，满以为可以舒坦一阵日子了。没想到没过多久，新的麻烦又找上门来了。小笨发现，在某一种情况下通话非常嘈杂，基本都打不了电话了，如图 4.12 所示。



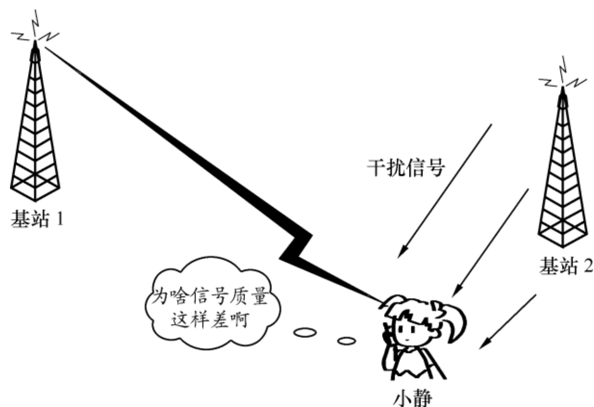


图 4.12　小静的困惑

小笨给小新介绍情况："昨天友情邀请了一下师妹小静帮忙测试。结果发现小静和比较远的基站 1 通信时，离她很近的基站 2 的信号对通话信号产生了强烈的干扰，结果信号质量变得非常差。"

小新挠挠头，有点不解："GSM 里面也有这种通话场景啊，没见到这么强烈的干扰……"

小笨狠狠捶了小新一下："你忘了 GSM 相邻的基站是不能采用相同的频点的么，不同的频点哪有什么强干扰呢。CDMA 可是同一个频段啊，你看图 4.12，像不像'远近效应'的翻版，上一个远近效应是基站接收的场景，这个远近效应是手机接收的场景"。

小新依然有点困惑："既然手机离基站 2 比基站 1 近得多，基站 2 的信号也远强于基站 1，那么为什么手机不切换呢，切换到基站 2 不就妥了吗？"

小笨的脸刷地一下红了："嗯，兄弟，这个……凡是一个新东西，总有一个发展的过程嘛。这个是因为切换流程走得太慢了，还没来得及切换呢。"

话外音：这一段并非作者杜撰，高通公司创立 CDMA 之初，因为切换很慢，网络中遇到了图 4.12 中所述问题，后来不得已想出了软切换的办法加以解决。

小新灵光一现，想出了一个好主意："切换慢不要紧嘛。你看这样吧，基站 2 也不要站在旁边干看着了，它也可以和小静建立通路，发送同样的内容给小静。由于小静和基站 1 以及基站 2 都建立了双向的通路，那么我们完全可以采取图 4.10 中的解决方案了。也就是小静的手机设定一个基准的 C/I，要求基站 1 和基站 2 发送的信号都要满足这个 C/I，嗓门大的就降低一点发射功率，嗓门小的就提高一点发射功率，如图 4.13 所示。"

"等等，怎么样保证基站 1 和基站 2 发给的信号内容都是一样呢？"小笨问道。

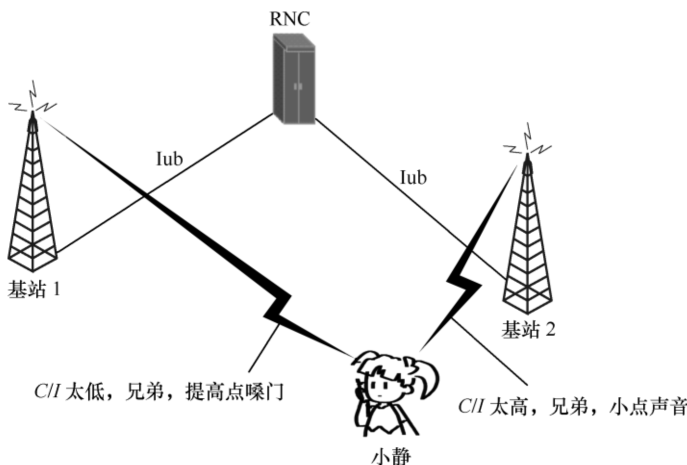


图 4.13　同时和多个基站连接

“基站的数据从哪里来？还不是从它的上一级 RNC 中来，RNC 通过 Iub 接口给基站 1 和基站 2 发一样的数据不就行了。”小新呵呵一笑：“我觉得小静的手机可以不止和基站 1、基站 2 连接嘛。只要旁边还有合适的基站，也可以连到一起，3 个、4 个都行，当然也不要太多，免得浪费基站的资源。如图 4.14 所示。”

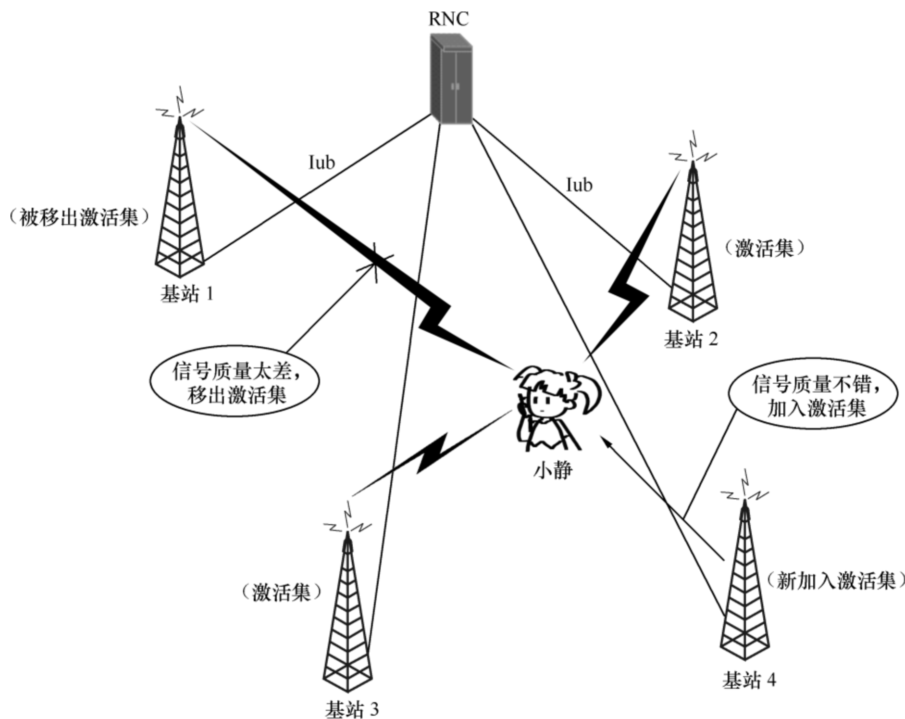


图 4.14　软切换



大家可以看到，当前和小静的手机相连的基站一共有 3 个，分别是基站 1、基站 2、基站 3，这些基站都给小静发送信号（图中闪电模样），对于小静的手机而言是“激活”的，所以称之为“**激活集**”；基站 4 虽然和小静建立了连接，但是小静的手机并没有和它交互数据，只是在监测它的信号质量，合适的时候就添加进激活集，用来替换原来信号质量比较差的基站 1，所以基站 4 就属于“**监测集**”。

当小静与基站 1 渐行渐远，走到基站 2 的范围，同时与基站 1 的链路连接质量越来越差，已经低于设定标准的时候，小静的手机与基站 1 的连接就会断开，会驻留到基站 2 的小区下面，这个过程也叫做“**切换**”。由于小静的手机原本就和基站 2 有连接，整个通信过程中没有中断，所以这个过程也叫做“**软切换**”。同时占有多条链路的切换都叫做软切换。

软切换降低了掉话的概率，因为它同时利用了多条链路的资源，东方不亮还有西方亮，但同时和多个基站连接对资源也是一种消耗，可谓有得也有失。

4.2.3　搞通信如同做物流

应当说有了功率控制和软切换之后，CDMA 技术的关键障碍已经被扫清，我们可以去探讨一些更细节的内容。我们从图 4.2 中摘出 RAN（Radio Acess Network，无线接入网）侧，如图 4.15 所示，这是本书要重点关注的内容。至于 MSC、HLR、VLR 等，都是属于无线核心网的内容，大家可以参考相关的书籍。

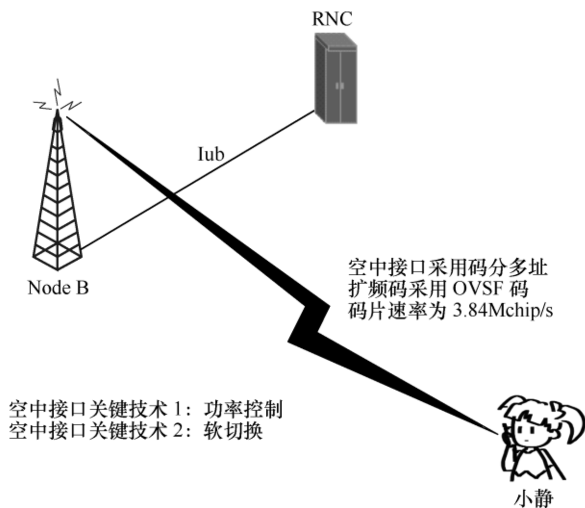


图 4.15　RAN 侧的设备

在图 4.15 中简单地列举出了我们当前围绕 RAN 侧都学习了哪些知识。从图 4.15 中我们也可以看到，目前讲的还都是一些宏观的东西或者关键的技术，而并没有去具体描

述它们具体是怎么工作的，这就是我们接下来要讲的内容。

其实说起来做无线通信的与做物流的也没有什么本质的区别，通信和物流的本质都是要把一样东西从一个地方传送到另一个地方，差别在于通信传送的是比特流，而物流传送的是实实在在的物理实体。

我们拿一次 B2C 业务的物流过程来打比方，因为这样来得比较简单。假设你在“京西网上商城”买了一件东西要给你长沙的朋友，我们来看看物流公司需要组建哪些部门才能够完成这个任务。

首先，这家公司在长沙要有配送中心，没有配送中心是没法把东西送到你朋友手上的。这个配送中心需要有单车、摩托车和卡车。假如你买的是书的话，那么只需要单车就可以了。如果买的是笔记本电脑之类比较大的东西的话，那么需要摩托车才方便运送。如果买的是冰箱、彩电，那就非得卡车不可了。

其次，这家公司应该在武汉有物流中心作为货物集散地，除了配送中心以外，物流中心也是很关键的，因为你不可能把所有货物都堆在配送中心，那样很不经济划算。除此之外，信息化系统也装在物流中心，它需要监控每一笔业务的配送情况，保证无差错地送到每个客户手里。物流中心下设两个科室，一个叫做调度科，这个科室负责根据客户货物量的大小远程调度车队资源（单车、摩托车、卡车）来实现配送；另一个叫做质检科，负责给这些货物进行打包，如果客户的货物丢了，这个科室要负责重新发送。

这样，就形成了物流公司的简单构架，如图 4.16 所示。

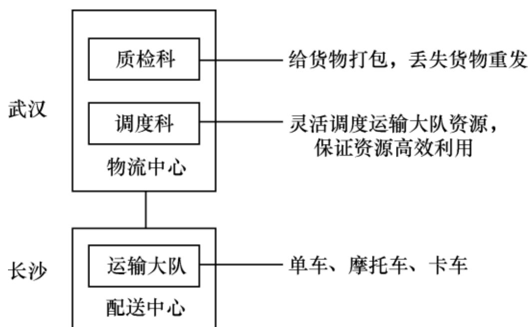


图 4.16 “京西网上购物商城”的物流公司

很值得庆幸的一点是，我们的 RNC 和 Node B 跟一个物流公司几乎有着完全相同的组织架构，大家对比起来学习和记忆比较方便。在这里，物流中心就好比 RNC，配送中心就好比 Node B。

配送中心的运输大队就好比 WCDMA 的物理层，物理层存在于 Node B 中。运输大队的资源就好比 OVSF 码，单车能运输的东西少，就好比 $SF = 128$ 的扩频码，摩托车能运输的东西多，就好比 $SF = 64$ 的扩频码，卡车能运输的更多了，就好比 $SF = 16$ 的扩频码。在扩频系统中，码字越小，速率越快。

物流中心的调度科就相当于 WCDMA 中的 MAC 层（Media Access Control，媒体接入控制层）。调度科的价值在于根据货物量大小有效给运输大队分配资源，而 MAC 层的价值在于根据数据流的多少有效给物理层分配资源。

物流中心的质检科就相当于 WCDMA 中的 RLC 层（Radio Link Control，无线链路



控制层)。质检科的作用是给货物分批打包,如果客户反映没收到货,就给客户重新发货。RLC 层的作用与质检科相似，其主要作用在于承接上层的数据，然后把上层的数据分割成一个个的数据包，如果手机丢失了数据就反馈到 RLC 层，RLC 层将重新发送数据给手机。

这样一来，我们就有了物流公司和我们的无线接入网的对比图，如图 4.17 所示。

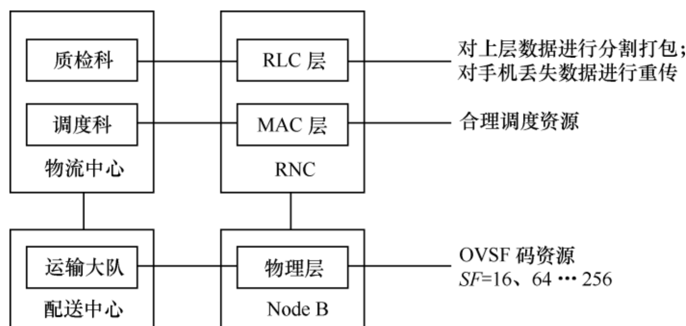


图 4.17　RAN 侧与物流公司的对比

除以上 3 块内容以外，由于电磁波在空中快速变化的特性，RNC 还有一块与物流相比而言比较独特的内容，那就是 4.2.2 节描述的“切换”与“功率控制”，这两者的作用都是为了保证空中接口的链路的可靠性。除这两者之外，RRC 层还可以根据自身的负荷情况的策略对空中接口进行负荷和接纳控制。上面这些工作都属于 RRC（Radio Resource Control，无线资源控制）层的工作，在物理实体上属于 RNC，如图 4.18 所示。RRC 层的这些作用可以说是被电磁波的传播特性给逼出来的，我们并不好从现实生活中（比如物流）找到相似的场景，所以无线资源管理的工作，大家就拎出来单独看吧。

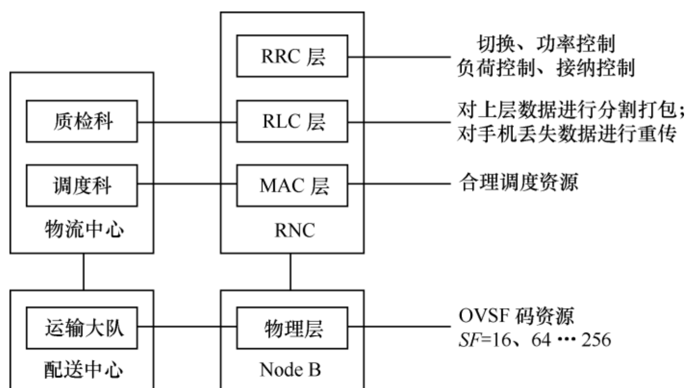


图 4.18　包含了 RRC 层的 RNC

应当说图 4.18 还只是将空中接口的层级化结构和物流公司的层级化结构进行一个

初步的、粗略的对比。其中 RRC 层的工作我们已经在 4.2.2 节中阐释过了，接下来我们就要分别了解 Node B 中的物理层和 RNC 中的 MAC 层以及 RLC 层，看看它们分别都能完成怎样的工作。

4.2.4　组建运输大队—　OVSF 码

应当说物理层的资源有两种：第一种是 OVSF 码资源，也就是图 4.4 所示的 OVSF 码树；第二种是功率资源，WCDMA 一个载波的功率是有限的，标准是 20W，也有 40W 的，所有用户的信号都是来共享这个功率，每个用户信号根据其信道质量要求和空中接口传输速率的大小分配的功率也不相同。功率的分配相对而言没有 OVSF 码的分配那么重要，也比较复杂，所以在本小节只讨论 OVSF 码的分配，功率部分的内容请自行阅读相关书籍。

对图 4.19 所示的 OVSF 码树，我们已经不陌生了，这个图在 2.2.2 节中出现过，在 4.2.1 节中也出现过。但是在那两小节中，我们只是介绍了 OVSF 码的正交特性，并没有说清楚这个为什么是空中接口的资源。

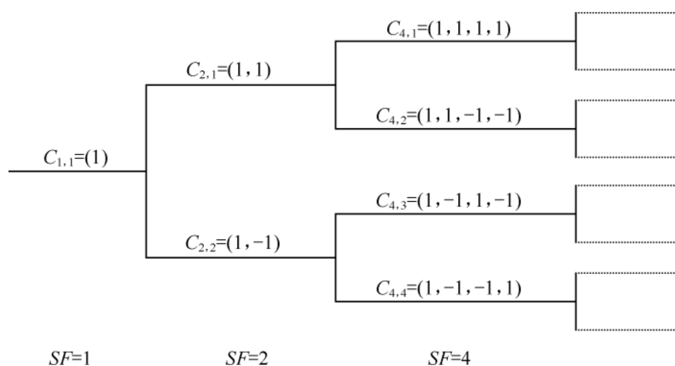


图 4.19　OVSF 码树

所谓**“资源”**，说的是每个 OVSF 码都可以对应空中接口的一条物理信道。根据这个 OVSF 码扩频因子的大小（即 SF 码，Spreading Factor），其对应的物理信道的**符号速率**也是固定的。也就是说一个 OVSF 码对应了一条物理信道的信道容量，所以 OVSF 码也被称为码资源。在这里，我们举一个例子来说明。

假设空中接口有一条话音信道，它占用了 Node B 的一个 $SF = 128$ 的码字，那么其符号速率是多少？所谓 $SF = 128$，也即话音信道的每“1 个符号”都与“128 个码片”相乘，从而使得它的速率和占用带宽都与码片一致。WCDMA 空中接口的码片速率是 3.84Mchip/s，因此我们不难得出这条话音信道的符号速率为：

$$码片速率/扩频因子 = 3.84\text{Mchip/s}/128 = 30\text{ksymbol/s}$$



也即话音信道的“**符号速率**”为 30ksymbol/s。在这里，我们必须强调一下这样得出的是**符号速率**，而非**比特速率**，请看图 4.20。

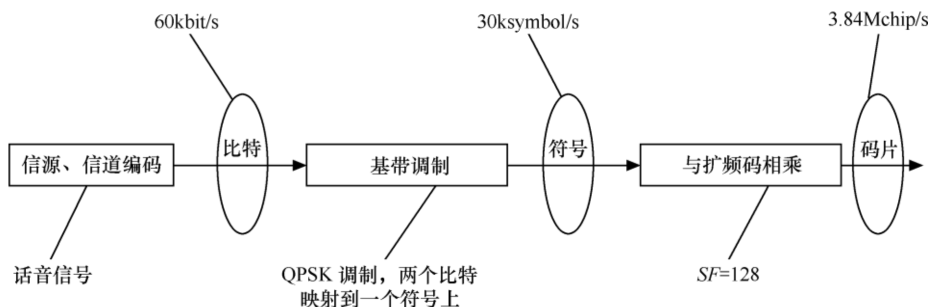


图 4.20　码片速率、符号速率、比特速率

WCDMA 在下行链路中通常采用的是 QPSK 调制，如图 4.21 所示，两个比特映射到一个点位上。所以当符号速率为 30ksymbol/s 的时候，其比特速率为 60kbit/s。

在 WCDMA 中，我们采用不同的扩频因子来对信道进行区分。问题是，在下行方向，每个小区都有一棵码树，相邻小区完全有可能分配相同的码字；在上行方向，每个终端也都有一棵码树，离得不远的终端也可能分配相同的码字。相同的码字必然会带来干扰，这个问题怎么解决呢？

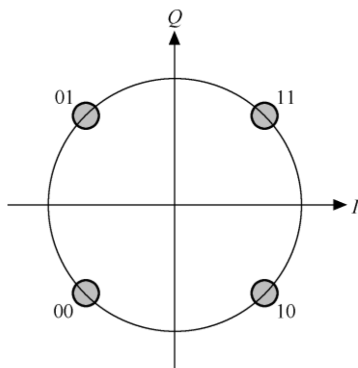


图 4.21　QPSK 点位图

4.2.5　运输大队的编号— 扰码

如果把每一个发射信号的信源的信道资源比作运输大队的话，那么不同容量的 OVSF 码就是运输大队的单车、摩托车、卡车。由于每个运输大队都有这些交通工具，如果不对不同的运输大队进行编号的话，那么这些交通工具就很有可能弄混。而“扰码”的作用就是对这些“运输大队”进行编号，以避免混淆。

我们把目光再一次放到图 4.19 上，前面已经介绍了 OVSF 码是如何正交的，也讲了 OVSF 码的使用原则，那就是“上面用过的下面不用，下面用过的上面不用”（$C_{2,2}$ 用过了，那么下面的 $C_{4,3}$ 就不要再用了，此所谓“上面用过的下面不用”；$C_{4,2}$ 被占用了，那么上面的 $C_{2,1}$ 就不要再用了，此所谓“下面用过的上面不用”）。

看起来这样一来就不会有重复使用码字导致不正交的问题了，但是依然有一个隐患，很大的隐患！请看图 4.22。

假设世界上只有一个手机，假设这个手机就是手机 1。那么前面所述的 OVSF 码的

使用方式是没有问题的。但是现在不止一个信源，不止一个手机，每个手机都有一个码树，那么麻烦就来了，必然有些手机或小区会用到相同的 OVSF 码，这就没法区分了。

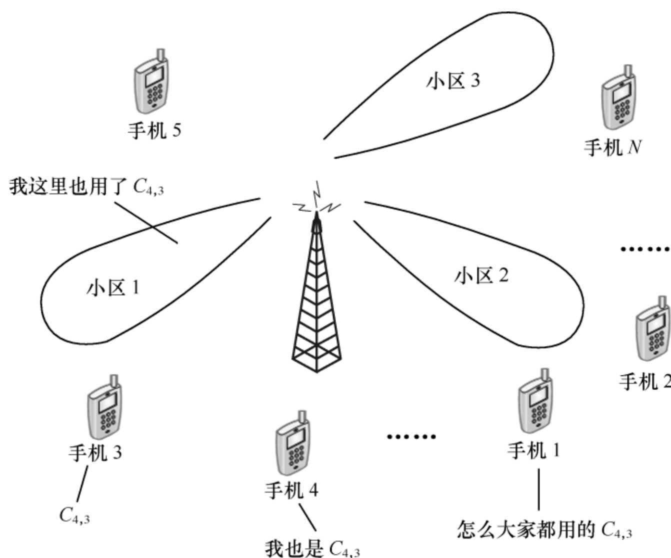


图 4.22　不同的信源，相同的 OVSF 码

为了区分不同的信源，在 OVSF 码之外，又设置了一个新的码字，叫做扰码，扰码的速率与扩频码一样，也是 3.84Mchip/s。于是，图 4.6 所示的流程就变成如图 4.23 所示。

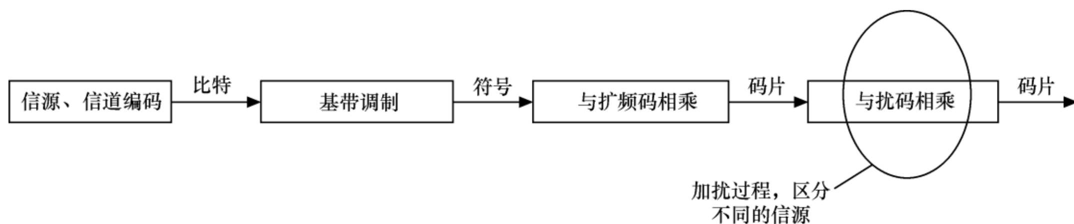


图 4.23　加扰过程

请注意，扰码在上行方向可以区分不同的终端，在下行方向可以区分不同的小区（非基站，因为一个小区使用一个载波，就是一个信源）。

在下行方向，一共有 512 个扰码，分为 64 组，每组 8 个（WCDMA 的扰码的分配有点像 GSM 中的频点分配，相邻的小区是不能分配相同的扰码的。由于扰码有这么多个，所以分配起来比 GSM 的频点而言要简单得多）。

在上行方向，有数以百万计的扰码，因此给一个小区下的不同的手机分配不同的扰码更加不是问题。

在 WCDMA 里面，一个码树和一个扰码一起配合使用，以传输来自终端或基站的单



个信源的信息。这也意味着不同的终端和基站可以完全独立地运用各自的码树，不需要对不同的基站或终端之间的码树资源的使用进行协调。

4.3 少年 WCDMA 之烦恼二— 资源如何分配

我们在上一节里介绍了 WCDMA 空中接口的资源，主要是码资源。在这一节里，我们想来了解一下，扩频码资源都是如何分配给用户的。码资源是很稀缺的，每一个扩频码分配出去，都必定有一项具体的作用，都必定是由某项业务过程引起的。所以，对扩频码的使用情况进行研究，不仅有利于我们加深对空中接口的理解，也有利于我们了解一个用户业务过程的来龙去脉。

我们在 3.2 节中介绍过 GSM 空中接口的帧结构，在这里，不妨先来了解一下 WCDMA 空中接口的帧结构，如图 4.24 所示。应当说 WCDMA 空中接口的帧的时间长度是比较好记的，10ms，比 GSM 那 4.615ms 的古怪数字（见图 3.15）记起来要方便多了。

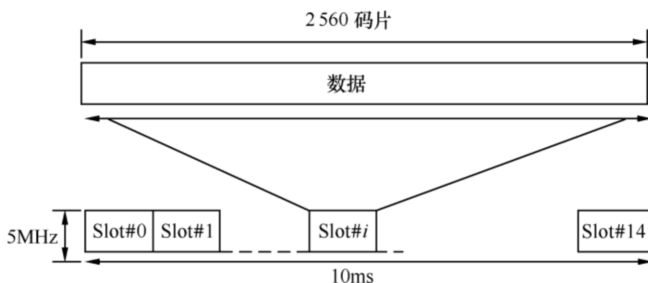


图 4.24　WCDMA 的帧结构

我们看到，WCDMA 空中接口的帧结构与 GSM 还是有很多相似之处的，两相对比着学习有利于加深我们的记忆。不同点在于以下几点。

（1）WCDMA 占用的带宽为 5MHz，而 GSM 占用的带宽为 200kHz；

（2）WCDMA 一个帧的时间长度为 10ms，GSM 一个 TDMA 帧为 4.615ms；

（3）WCDMA 一个帧有 15 个时隙，而 GSM 中只有 8 个时隙。不过请大家注意，在 WCDMA 中虽然有时隙的概念，但这些时隙并不是时分复用分配给很多用户的，而是都是给同一个用户的，这是与 GSM 里面的时隙的最大不同。采用时隙化设计不过是为了降低接收机设计的难度。

大家知道，WCDMA 的码片速率为 3.84Mchip/s，那么我们不难得出一个帧的码片数量为 3 840 000/100 = 38 400 码片。那么每个时隙的码片数为 38 400/15 = 2 560 码片，这就是图 4.24 中一个时隙占用 2 560 个码片的由来。

介绍完帧结构之后，我们可以开始结合业务流程来谈谈 OVSF 码资源的分配了。

4.3.1 年年岁岁花相似— 无线的标准套路

但凡无线通信，总是逃不过那几个步骤，我们根据这些步骤就知道基站要分配资源给哪些信道。首先是手机要完成和基站小区的同步，也就是说基站需要有**同步信道**来给手机提供一个时间基准，从而完成同步；其次手机要驻留在一个小区下，它必须要知道这个小区的很多信息，比如位置区号、小区号、允许的最大发射功率是多少、有哪些邻区，等等，这就要求基站必须来广播这些信息，保证手机都能听到这些信息，这就是**广播信道**的起因，只有听到了广播，了解了相关信息，手机才能进行下一步的动作；除此之外，为了能找到被叫用户，基站必须预留一定的信道资源用于用户**寻呼**；当手机发现自己被寻呼后，它接下来就需要接入网络，那么它就向基站发起随机接入，如果有足够的资源分配给这个手机，那么基站就需要通知相应的手机它可以接入了，这个信道在 GSM 里面叫做接入允许信道，在 WCDMA 中叫做**捕获指示**信道。在“同步—收听广播—被寻呼—接入网络”这一系列动作完成之后，手机就建立了和网络的连接，那么接下来就要进行信息交互，在这个过程中，显然是需要**业务信道**的。

无线通信的这几个标准套路动作我们在 GSM 里面看到了，在 WCDMA 里面也看到了。在 TD-SCDMA、cdma2000、LTE 里面依然会继续跟它们打照面，足见搞清楚这几个套路有多么重要。接下来的小节里，我们将看到 WCDMA 是怎么演绎这些标准动作的。

4.3.2 当好管家不容易— OVSF 码的分配

我们知道，OVSF 的码树跟信源是一一对应的，一个载波对应一棵码树。在上行方向，一个手机也对应一棵码树。而一个载波同时需要和 N 个手机进行通信，所以下行链路的码资源比上行链路要稀缺得多，如图 4.25 所示。

在下行链路上，通常码资源的数量是不够用的，我们希望好钢花在刀刃上，希望每一个扩频码都能用于承载话音和用户下载的数据，因为只有这部分内容能带来收益。事实上这不可能，因为一部分码资源必须分配给控制信道，由控制信道来完成 4.3.1 节所说的“标准动作”。这就好比一家公司一样，不可能所有人员都是销售人员或者技术人员，必须有一部分管理人员把整个系统串联起来。在无线通信中，公共控制信道和广播信道就是这样的“管理人员”。

接下来，我们要来讨论的是如何给每个控制信道分配 OVSF 码。学习这个内容有两个好处：其一，码资源非常有限，我们可以通过这个过程学到 WCDMA 是如何节省地利用码资源；其二，我们可以借机梳理一下无线通信的流程，因为各种无线通信标准其流程非常相似，读透一种碰到其他的也很容易举一反三。



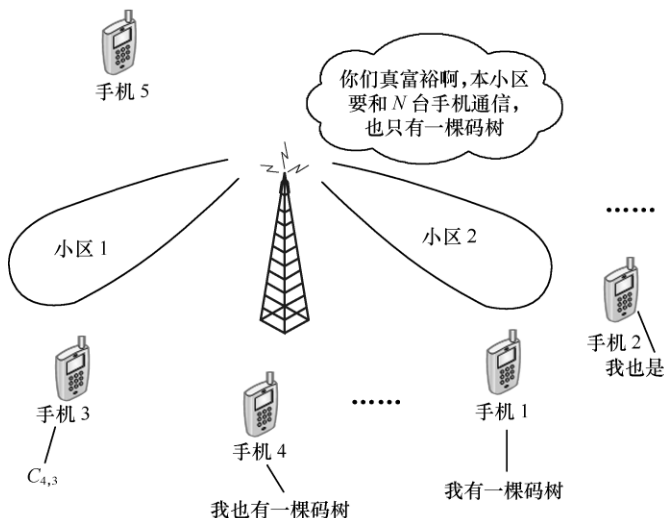


图 4.25　下行链路稀缺的码资源

1. 欲通信，先同步

手机开机之后，会先根据 SIM 卡里存储的信息去锁定上次通信的那个频点。找到之后，就开始和基站的同步过程。同步的意义在于保证每个比特都出现在它该出现的位置，对于“0、1”化的通信世界而言，这非常重要，错一个位置意思的差别会很大。

在 WCDMA 中，要完成同步，手机必须知道信号什么时候开始发射，也就是说找到时隙开始的地方，或者说边界。于是，基站设置了一个主同步信道 P-SCH，主同步信道上发射的是主同步码，主同步码在每个时隙的最开始的 256 个码片上发射，发射主同步码的时候，手机滤波器上就会有高电平指示，由于主同步码是一个固定的序列，在每个时隙都是相同的，这样就获得了时隙同步（一个时隙有 2 560 个码片，256 个码片也就是一个时隙 1/10 的时间）。

我们可以从图 4.26 中很清楚地看出主同步信道只在每个时隙的前 256 个码片上发射，其他时间这个同步信道是不发射任何信号的。

假如是 GSM 的话，到这里同步就算完成了，因为 GSM 里面一个手机只占用一个时隙，它只要搞清楚自己所在时隙的位置就可以了，对于其他时隙的位置它懒得管。WCDMA 就不同了，整个 15 时隙的一个完整的帧都是归一个手机的，所以，它还必须搞清楚帧的边界，这就必须再增加一个同步信道来完成这个任务，于是基站又设置了一个从同步信道 S-SCH，如图 4.27 所示。

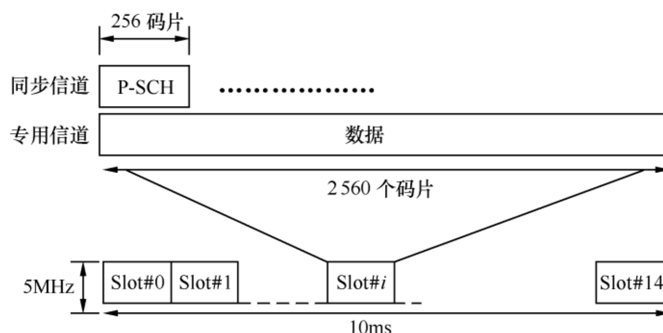


图 4.26　主同步信道

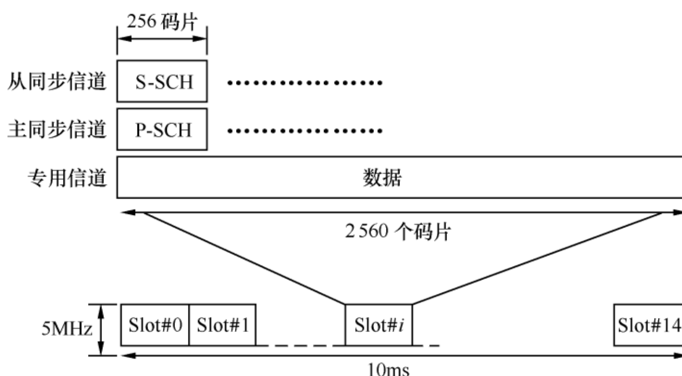


图 4.27　从同步信道

从同步信道上发射从同步码，从同步码也是在那 256 个码片的时间发送，其他时间不发送信号。所以根据搜索主同步码时检测到的信号的峰值非常有用，手机可以在这个位置继续寻找从同步码。由于从同步码在每个时隙都是不同的，所以把所有 15 个位置都搜索一遍之后，帧的边界也敲定了。除了确定帧的边界，从同步码还有一个作用，即确定主扰码的码组。

应当说 WCDMA 中的同步是挺复杂的，一般人读起来感觉比较晦涩。我们不妨来打个比方说明这个同步过程是怎么实现的。首先假设一天只有 6 个小时（没办法，如果按 24 小时画图还不累死作者我和看晕读者你），你被关在一间小黑屋子里，你的手表时间是乱的，请问你怎样才能校准你的手表？

假设你屋子的旁边有一座教堂，每到准点的时候就会“当——当——当”敲 3 下钟，说明整点到了。你根据这个就可以校准好你手表的时针和分针，但是你只知道这是一个整点时间，并不知道是几点，也不知道一天是从什么时候开始的（只能锁定某个时刻的起点，而不能判断这个时刻的具体位置，看看是不是像 P-SCH 的功能）。

很幸运，你被关进这间房子之前得到了一张课程表。这张课程表是教堂旁边的音乐



学院的声乐系的。每当钟声敲响的时候，音乐学院的学生就会唱歌，你可以在这个时间点竖起耳朵来听他们唱歌，然后根据课表来判断具体的时间。你并不好判断是哪个班级在唱歌，因为有 6 个班级。这张课表是这么排的，如图 4.28 所示。

	0 点	1 点	2 点	3 点	4 点	5 点
班级一	马赛曲	马赛曲	菊花台	东风破	传奇	神话
班级二	神话	菊花台	笑忘书	杜凝眉	杜凝眉	杜凝眉
班级三	传奇	传奇	杜凝眉	马赛曲	笑忘书	菊花台
班级四	笑忘书	笑忘书	杜凝眉	笑忘书	马赛曲	笑忘书
班级五	杜凝眉	马赛曲	笑忘书	传奇	东风破	传奇
班级六	笑忘书	传奇	菊花台	马赛曲	东风破	神话

图 4.28　音乐学院的课表

图 4.28 有两个特点，第一个特点是听到任何一首歌你都没法判断现在是几点，比如说《杜凝眉》，可能是 0 点，也可能是 2 点、3 点、4 点；第二个特点是你听他们唱完几轮后你一定能找到是哪个班级唱的，因为每个班级唱的歌其排列顺序不一样，顺带着你也就能判断 0 点是什么时候了，也就能校准你的手表了。

如果你把表格的纵列由“6 个小时”变成“15 个时隙”，横排由“6 个班级”变成“64 个扰码组号”，然后再在表里填上数字。那么就完全可以阐述清楚 S-SCH 的工作方式了，S-SCH 就是通过这种方法来确定一个帧的边界（几点）和一个基站小区所采用的扰码的组号（班级号）的。

可能有人觉得这种判断帧的边界的方法非常麻烦，也许觉得以图 4.29 所示的方式来敲定帧的起始地点要方便得多。图 4.29 中，不论听到哪首歌都可以判断现在的时间。

0 点	1 点	2 点	3 点	4 点	5 点
马赛曲	笑忘书	菊花台	东风破	传奇	神话

图 4.29　课表改良版

是的，图 4.29 所示的方法确实方便多了，随便听到哪首歌都能校准好时间。问题是，（大家应该也注意到了）最左边那一列没有了。也就是说，这种方法虽然能更简便地判断帧的边界，但是我们没办法判断扰码的组号了。这是一个很大的麻烦，因为除了同步信道这种已经固定好，且每个基站小区都一样的序列，其他信道都是要加扰的。为了保证能够有效对其他信道进行解码，我们必须把扰码找出来，既然如此，那么同步信道就该有点自我牺牲精神，浪费点资源先把扰码的组号找出来。扰码的组号找出来了并不意味着万事大吉，因为每个组还有 8 个扰码，我们必须确定是这 8 个里面的哪一个。

2. 找到保险箱的密码— 确定扰码

我们可以这么说，基站小区的扰码就像保险箱的密码，如果找不到扰码，接下来的通信过程就都没有办法进行。而掌握这把钥匙的，在 WCDMA 里面叫做公共导频信道（CPICH，Common PIlot CHannel），导频信道**有着全 0 的序列**（GSM 里面的 FCCH 信道也是全 0 序列），全 0 序列由于简单，可以方便地拿来对信道的情况进行校准。

导频信道的主要作用是辅助手机对小区进行信道估计，在切换和小区选择的时候都需要测量 CPICH 的电平值，同时它也是其他信道的相位和功率的基准。在 WCDMA 里面，它还有一个附加的功能，那就是用于确定扰码。

我们在图 4.24 里就画出了 WCDMA 空中接口帧的结构，到了 CPICH，我们终于有机会演示一个真正的信道是怎样的了，如图 4.30 所示。

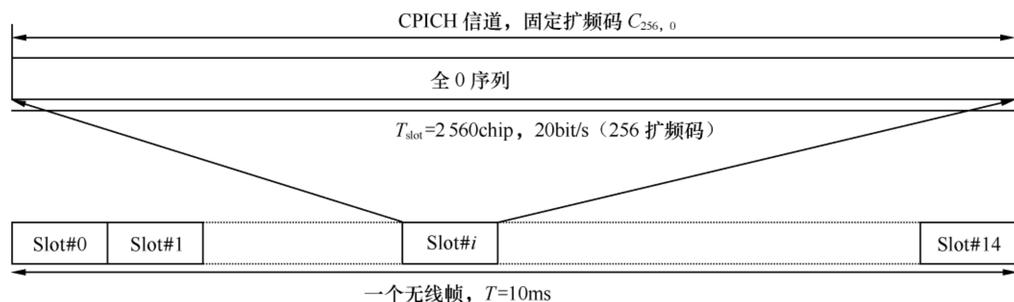


图 4.30 CPICH 信道

在完成同步后，手机只知道小区用的扰码的组号，但是这个组里有 8 个扰码，具体是哪一个，还不清楚。于是，就用 8 个扰码一个一个去试，直到解出一个全 0 的序列，说明这个扰码就对了。这跟开保险柜有点相似，给你 8 个密码，一个个去尝试，直到听到“嚓”的一声，保险柜开了，说明这个密码是对的。

CPICH 信道采用的是 256 的扩频因子，但并不意味着每个 256 的扩频码都可以用。如果不是固定的扩频码，每次的扩频序列都不相同，就没有办法保证解扰后的信号与扩频信号相乘得到的是全 0 序列。所以给了它一个固定的扩频码 C_{256}，如图 4.31 所示。

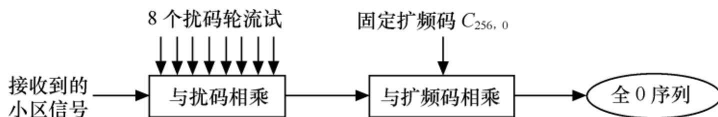


图 4.31 CPICH 信道的固定扩频码

如果哪个扰码对 CPICH 解码得出的是全 0 序列，说明它就是正确的扰码。然后我们可以通过扰码这把钥匙去解码其他信道。扰码找到之后，我们就完成了信息交互前的所



有工作，如图 4.32 所示。



图 4.32　信息交互前的工作

3. 收听广播

手机完成和基站的同步了，打开大门的“钥匙”——扰码也找到了。接下来手机需要收听一下基站广播的内容，比如说小区号、LAI 号，允许手机发射的最大功率、邻小区等相关信息，好知道接下来该怎么做。

完成这个广而告之工作的在 GSM 里面叫做 BCCH 信道，而在 WCDMA 里面叫做 P-CCPCH 信道（Primary Common Control Physical CHannel，主公共控制物理信道）。这个信道也和 CPICH 信道一样，用的是 256 的扩频码。现在我们看看图 4.33 所示的 OVSF 码树，就会发现一个问题，这么多 OVSF 码，我们怎么知道 P-CCPCH 信道占用的是哪个码字？

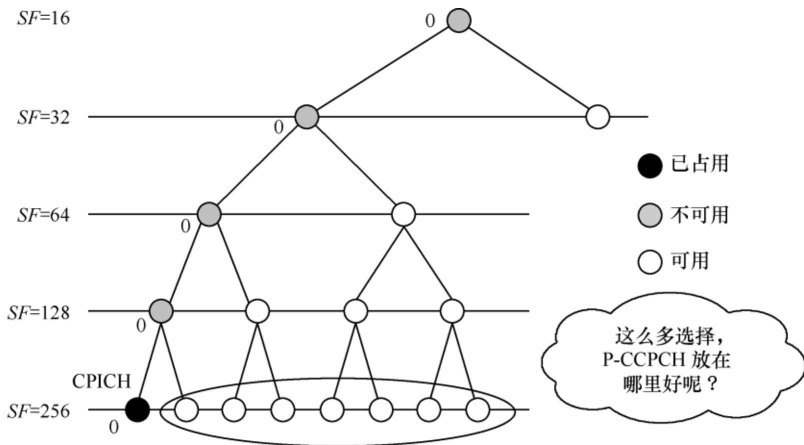


图 4.33　OVSF 码树部分

图 4.33 其实就是 OVSF 码树的 $SF = 16$ 及往下的部分，在图中，CPICH 已经占用了 $C_{256,0}$ 的码字，我们刚才说了，P-CCPCH 也是 $SF = 256$ 的信道。作为 $SF = 256$ 的信道，在 CPICH 已经占用了一个码字的情况下，它还有 255 个选择。那么该怎样选择呢，是选

择一个固定的码字，还是每个基站可以根据自己的需要选取这 255 个中的任意一个？

P-CCPCH 选择了前者，如果它的扩频码不固定，那么手机每次收听广播的时候都要到那 255 个扩频码上挨个检索它，这是一件多么麻烦的事。于是，为了节约码字起见，P-CCPCH 选择了 $C_{256,1}$ 码字，也就是跟 CPICH 做邻居，如图 4.34 所示。

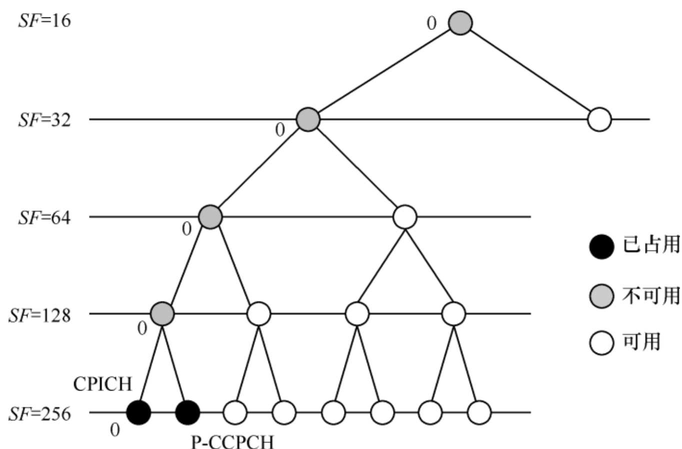


图 4.34　P-CCPCH

到这里我们不过是完成了同步、导频、收听广播，同步信道由于是固定的序列，就高风亮节地没有使用扩频码。而已经开始用扩频码的导频信道和广播信道，通通都用的固定的扩频码，那么我们接下来的其他信道，是不是都会是固定的扩频码呢？

实际上，从广播信道往后的其他信道，就不再需要固定在某个位置了，可以自行设置。这是因为广播信道里会广播调度信息，告诉手机某某信道现在使用的是哪个扩频码，手机就可以按图索骥了。

4. 收听寻呼消息

手机收听完广播消息，知道了网络的状况，然后就会选择一个小区驻留下来，这个时候就是我们通常意义上所说的“待机状态”。平时手机所宣称的待机时间，就是按这个状态的耗电量来计算的。

然而手机在待机状态并不意味着什么都不干，它需要竖起耳朵来听听是不是有人要找它。在机场等飞机或者在火车站候车的人一定有过类似的经验，虽然你坐在位子上休息，但你的耳朵一定还在工作，它需要听候车室的那个大喇叭的信息“某某班次的旅客请注意了，列车就要出发了，请马上上车……”。

在移动通信系统里，也有这么一个大喇叭，那就是 PCH 寻呼信道，它时时刻刻在提醒你是否有人在找你。PCH 寻呼信道在 GSM 里面和在 WCDMA 里面的处理方式还不



太一样。

GSM 采用的是一条单独的 PCH 信道，手机通过不连续接收来收听寻呼消息。什么叫不连续接收呢？就好比你在候车室里每隔一段时间来收听大喇叭里传来的广播消息。

至于为什么要“每隔一段时间”大家可能不太好理解，我们不妨这样来打一个比方。比如说你在北京西站的候车室，为了让你能更好地休息，工作人员根据身份证尾数号码把大家分成 10 组，尾数为“1”的一组，这组人在 12:11 分，12:21 分……收听寻呼；尾数为“5”的一组，这一组人在 12:15 分，12:25 分收听寻呼，这样的话大家听那个大喇叭的时间就缩短为原来的 1/10，精力就可以节省 9/10，岂不美哉。这就是 GSM 里面对于寻呼的处理方式。

不过这种方式仍然有不完善的地方，WCDMA 对此进行了改进。因为在你竖起耳朵的这一分钟，可能你们这一组根本就没有任何寻呼消息。一天下来，每隔这么一小会就要竖起耳朵听这么一分钟，岂不费事。

于是，贴心的工作人员又想出了一个新办法，他们在旅客的座位上安装了一个小喇叭，你只需要在相应的时间听一下小喇叭的动静，如果有“滴滴滴”3 声说明接下来的时间里有你们这个组的寻呼消息，你就需要认真听，看有没有找你的，否则的话接下来你就可以继续休息，不用听那个大喇叭的消息。这个小喇叭在 WCDMA 中叫做 PICH 信道（Paging Indicator CHannel，寻呼指示信道），它也占用一个 256 的扩频码。在 WCDMA 中，手机就不直接去解 PCH 信道了，它先来听听 PICH 信道，如果发现在对应自己的那段码流是全 1 序列，那么就去监听寻呼信道。这是跟 GSM 最大的不同，GSM 不管三七二十一都是需要去解 PCH 信道的，没有一个什么 PICH 信道来进行预先的提醒。

在 WCDMA 中承载 PCH 信道的物理信道叫做 S-CCPCH 信道（Secondary Common Control Physical CHannel，辅助公共控制物理信道），这个信道占用一个 128 的扩频码。

除了承载 PCH 信道的 S-CCPCH 信道以外，还有一个 S-CCPCH 信道用来承载 FACH 信道上的分组数据，在这里不多加解释。

到目前为止，我们就已经讲述完了一个手机不打电话、不上网时所要做的所有工作，如图 4.35 所示。

到现在为止，图 4.34 所示的物理资源占用情况又有了新的变化，如图 4.36 所示。

5. 发起接入申请

刚才我们讲到了手机需要监听寻呼消息，当手机通过寻呼消息发现有人在打电话找它时，它接下来该怎么办？毫无疑问，它需要接入网络，那么手机会向网络发起一个接

入申请，占用相应的资源来和对端手机接通以完成通话。

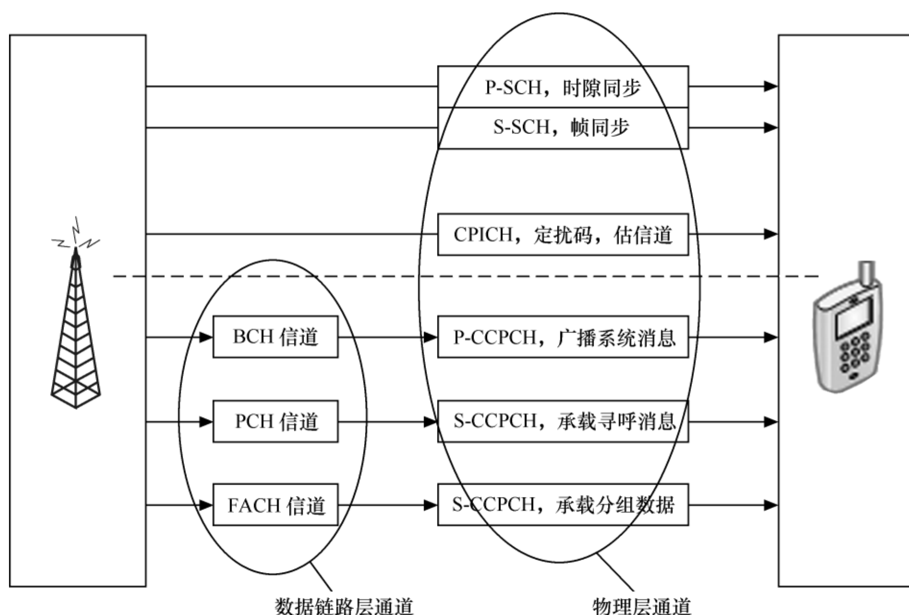


图 4.35　从同步到“待机”

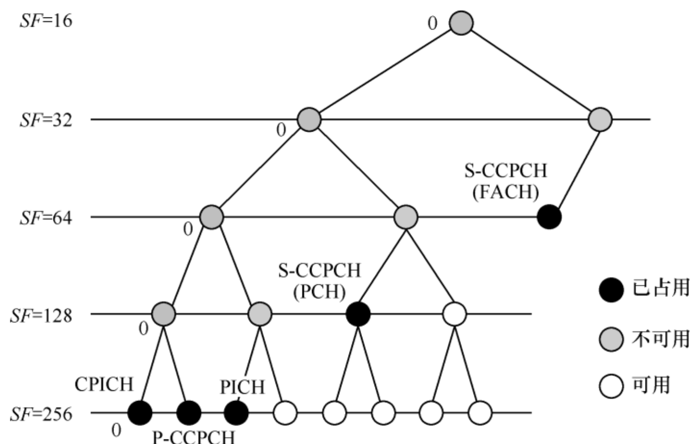


图 4.36　物理层资源占用情况

随机接入在一个叫 PRACH 的上行信道上进行，这跟 GSM 里面的 RACH 信道的作用很相似。请注意哦，随机接入申请发生在上行链路，只占用手机的码资源，而并不占用图 4.34 中的下行信道的码资源。PRACH 信道要占用多少上行链路的码资源呢？这就不好说了，根据数据量传输的大小，从 32～256 皆有可能。

既然有接入申请，那么就必然有接入批准，在 GSM 中，是采用的 AGCH 信道；在



WCDMA 中，是采用 AICH 信道（AICH，Acquisition Indication CHannel，捕获指示信道）来承载准入消息，AICH 信道也是采用 256 扩频码。由此可见，在 WCDMA 下行信道中采用 256 扩频码的真是挺多的，到目前为止已经有 CPICH、P-CCPCH、PICH 和 AICH。除了 CPICH 和 P-CCPCH 以外，其他两个信道的位置都是可以自行设置的，手机可以通过解码 P-CCPCH 上的系统消息得到它们的位置。

请注意图 4.37 中的箭头，我们刚才画的都是下行方向的箭头，这时终于有第一个上行方向的信号了，这标志着手机正式开始进行双向的通信（Communication），而不再是单向的收听广播（Broadcast）和解码寻呼消息（Paging），手机的业务过程开始了！

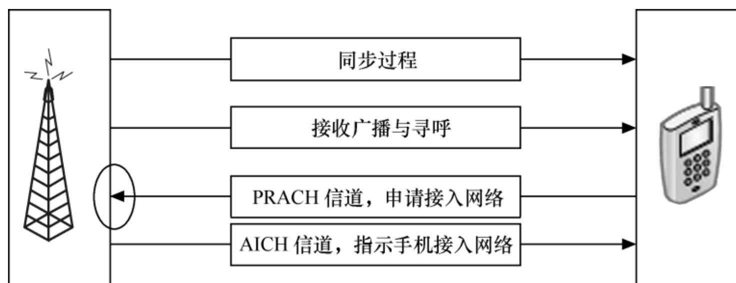


图 4.37 随机接入过程

6. 业务过程

手机申请接入网络之后，无线网络就会给手机分配相应的资源。如果是小流量的数据业务，就很可能分配一条 FACH 信道，在物理层则映射到 S-CCPCH 上。

如果是话音业务，就分配 DCH 信道，在物理层映射到 DPDCH（Dedicated Physical Data CHannel，专用物理数据信道）上。DPDCH 是一条纯数据传送信道，有些控制信息占用了它的一部分容量，和它时分复用一起传输。传输这些控制信息的信道叫做 DPCCH 信道（Dedicated Physical Control CHannel，专用物理控制信道）。

下行链路的扩频因子的范围是 4～512，到底选择多大的扩频因子在业务开始之时就已经固定下来了，后续传输过程中不会再发生改变。这很好理解，下行的码树可是 N 多手机共享的，你的码字说变就变这个码字的分配就变得很难控制了，系统会复杂得难以设计。

有些人可能不同意这个观点，他说我现在通过手机上新浪，看看新闻，流量并不大，可能给我分配一个 $SF = 256$ 的码字也就够了（$SF = 256$ 对应 30kbit/s 的速率）。可是我在看新闻的时候发现一个有意思的视频，视频的流量可大多了，$SF = 256$ 的码字肯定不够，你又不让我改扩频因子，那我该怎么办呢？答案是再增加一条扩频因子比较小的 DPCH 信道，比如 $SF = 16$（对应 480kbit/s 的速率）。



请注意的是，图 4.38 演示的仅仅是下行的专用信道。在下行专用信道中，由于码资源比较有限，所以有些地方可以不用码资源的能省就省了。比如 DPCCH 信道，传输一些功率控制、导频、传输格式等相关物理层信息，消耗的资源并不多（在图中不好体现），所以就采取了和 DPDCH 时分复用。

而在上行链路，码资源可谓是大大的丰富（下行链路是 N 个手机共享一棵码树，上行链路是一个手机独占一棵码树），而上行链路的数据量一般都小于下行链路（上网主要以下行流量为主），不浪费一点资源简直都对不起观众。于是，上行链路的 DPDCH 和 DPCCH 采取的是并行传输的方式，如图 4.39 所示。

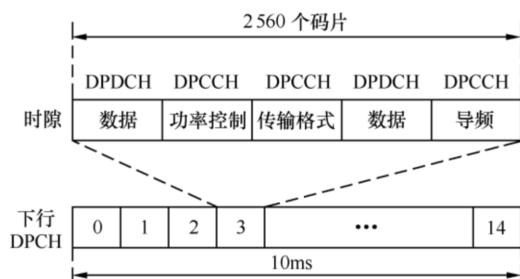


图 4.38　下行数据链路的帧结构

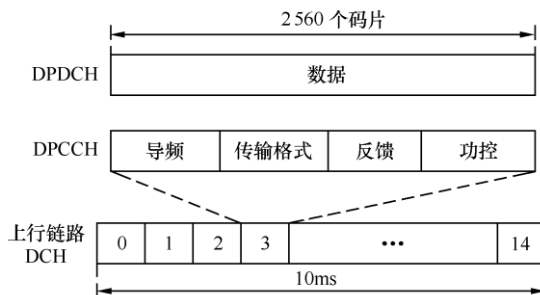


图 4.39　上行数据链路的帧结构

并行传输的原因也不全是因为上行链路的码资源丰富。试想一下，假如上行链路也采用图 4.38 所示的帧结构，会出现什么情况？由于随机接入或是打电话的时候在上行链路不会总是有数据传输，所以如果采用图 4.38 所示的结构的话“数据”那一部分就有可能为空白，没有内容传输。没有内容传输会导致帧传输一会儿有一会儿无，有点像脉冲传输一样，跟 GSM 颇有点相似。

请大家回忆一下你们在电脑音响旁使用 GSM 手机的情况。此时你正在打魔兽，然后电脑的小音箱放着音乐，好不快意。正在这时，你的电脑音响“得得滋……得得滋……”地响了起来，接下来会发生什么事情不用说你也知道，不是有电话找你就是你的手机收到了短信，为什么会出现这种情况呢？

让我们来看看 GSM 的帧长，GSM 是 TDMA 帧，帧长为 4.615ms，也就是一秒钟传输 217 个 TDMA 帧。由于 GSM 采用的是时分复用，一个手机的信号只在其中 1 个时隙上发射，所以就呈现“‘通—断’——‘通—断’……‘通—断’”这样的信号发射模式，当然断的时间比通的时间要长得多，我们可以说一秒钟通断 217 次，也就是 217Hz。

大家看到 217Hz 这个数字想到了什么？对的，人耳能听到的频率范围就是从 20～3 400Hz，所以这 217Hz 的脉冲方式就造成了可闻干扰。这种可闻干扰大家使用 CDMA 手机就不会听到，就有赖于这种并行的传输方式。



大家或许要问，WCDMA 下行链路采用的是时分结构，为什么没有造成可闻干扰呢？那是因为除了 DPCH 信道在发射信号以外，CPICH、P-CCPCH 也在一刻不停地发射信号，而这些信道是连续的、不中断的，所以当 DPCH 没有数据传输时并不意味着整个下行链路没有数据传输，也就不会出现脉冲方式的传送方式，自然不会出现可闻干扰。DPCCH 和 DPDCH 虽然不是并行的，但是它们和 CPICH、P-CCPCH 都是并行的，这就是 CDMA 手机听不到这种杂音的原因。

至此，我们就介绍完了一个 WCDMA R99 版本的空中接口的完整结构，在这里，给出一个完整的流程图以供大家参考，如图 4.40 所示。

P-SCH，时隙同步
S-SCH，帧同步
同步过程
CPICH，定扰码，估信道
BCH 信道
F-CCPCH，广播系统消息
待机过程
PCH 信道
S-CCPCH，承载寻呼消息
RACH 信道
PRACH，随机接入申请
接入过程
AICH，捕获指示信道
FACH 信道
S-CCPCH，承载分组数据
业务过程
DCH 信道
DPDCH，承载数据
DPCCH，承载物理层控制消息
数据链路层通道
物理层通道

图 4.40　WCDMA 从同步到业务的流程

对于图 4.40 有两点要注意，第一是 DCH 信道是双向箭头，我们打电话的时候，DCH 上下行都传送话音，我们上网的时候，DCH 上下行都传送数据，这是与其他信道区别的地方。但这并不意味着 DCH 上下行是同一个物理信道。实际上，上下行采用的扩频码、



扰码和频率都是不同的，从物理上而言是两个信道。

第二个要注意的是 AICH 信道，它并不承载高层信息，所以也没有数据链路层的通道（我们实际上把图 4.40 中的数据链路层通道叫做传输信道）。

现在大家把书回翻几页，看到图 4.36，把 AICH 信道填到 PICH 信道旁边，就会发现，在 WCDMA 中，公共信道对于码资源的消耗并不多，只不过占用了相当于 *SF* = 16 的 OVSF 码分支。还有 15 个 *SF* = 15 的 OVSF 码分支可以用于传送话音和数据，所以 HSDPA 中也恰好有 15 个码字可以用来传输数据。

4.4 少年 WCDMA 之烦恼三—　调度是个技术活

在 4.3 节中，我们详细描述了 WCDMA 中通信的过程以及对 OVSF 码资源的占用。4.3 节做的事情就好比如一家物流公司在总载重吨位一定的情况下（下行链路只有一棵 OVSF 码树），如何合理分配资源，根据业务需要来安排单车（*SF* = 256）、摩托车（*SF* = 128、*SF* = 64）、卡车（*SF* = 32 及以上）的配比，从而达到资源的最大合理化应用。

然后，我们的工作并没有完成，大家可以试想一下，假如一家物流公司只有配送人员和那些单车、摩托车、卡车，这家物流公司能否运行下去？

答案显然是否定的，如果一家物流公司没有调度，那么货物配置很可能极不合理，有的卡车可能运输的太多，有些可能运输的太少。运输效率低下，那么这家物流公司很可能就要赔本。同样，如果空中接口的资源没有有效的调度，那么底下的物理层的资源则很可能被浪费。4.3 节不过是完成了物理层的资源的分配，也就是对 OVSF 资源进行分配给各个信道。如何根据业务量的大小来合理将各种数据引导到物理层的各个信道，则是 MAC 层的工作。

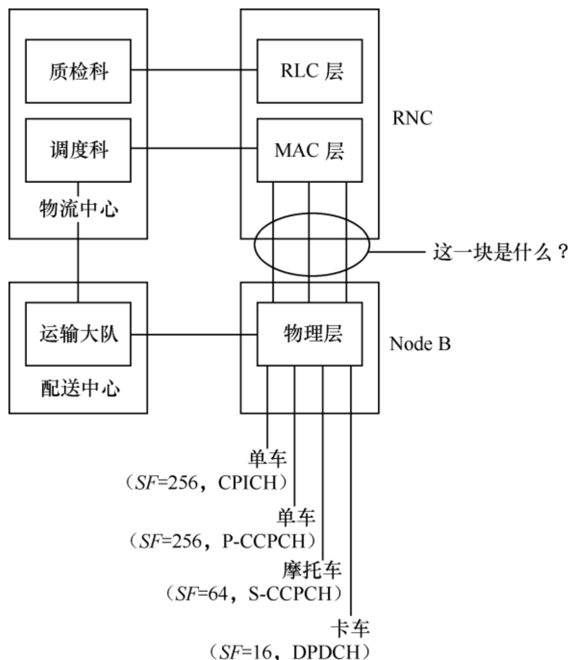


图 4.41　配送中心资源到位，调度中心虚席以待

我们在图 4.41 中画了一个圈，留了一个疑问。既然物理层可以通过物理信道把数据流送到空中，这些数据又不是



从天上掉下来的，那么总得有信道把数据从高层送过来吧？

这些信道就叫做传输信道，传输信道这个名字取得非常有意思，有利于我们记忆。因为接触过设备的人都会知道，RNC 一般放在中心局房里，而 Node B 则分布于每个需要覆盖的地方，RNC 和 Node B 之间相隔的距离挺远，它们之间需要通过**光缆**和**光端机**相连，也就是说，光缆和光端机是 RNC 和 Node B 之间的通道，这个通道有个名字与之相对应，就叫做“Transmission——传输”，传输在运营商的维护部门有专门的中心负责，在设备商里也有专门的产品线来生产相应的设备。所以，对此有所了解的人应该就不太容易把传输信道和物理信道弄混，一个存在于 RNC 和 Node B 之间，另一个存在于 Node B 和空气之间。

在介绍 MAC 层之前，我想我们有必要先了解这条流水线的上一环节，RLC 层。假如 WCDMA 是一家物流公司，那么它的顶层，也就是应用层就相当于业务部门。业务部门总是会接到汹涌澎湃的各式各样的快递物品，业务部门接收的东西就会形成一大堆物品到这个“质检部”。

“质检部”需要对这些物品进行分拣和打包，然后发送到调度科，由调度科决定分配到运输大队的哪辆车。同样，RLC 层也要对高层的数据进行分门别类的打包，然后交给 MAC 层，由 MAC 层来调度，底下的物理层来做苦力，负责把数据运送到位。如果出现了数据丢失，RLC 是需要重新发送的。

闲话少说，让我们从 RLC 层开始了解 WCDMA 空中接口的二层结构。

4.4.1　质检保证无差错进行传输

话说自从成立 WCDMA 物流公司以来，作为重要部门的 RLC 层就在认真思考自己的工作方法和工作流程。WCDMA 这个物流公司有点特殊，运输的都是比特流。

RLC 层的部门经理小笨同学上任之后，马上遇到了第一个问题。WCDMA 的业务部门（业务层）给他传送了一大堆“0011110101010110101001010101010101011100……”的比特流，堆得**物流中心**（RNC）满地都是，而且这些货物还在不断增加中，增加的速度不等，有时多有时少，需要赶快运出去。

部门主管小新犯愁了，这些货物待会就要搬到列车上送到配送中心了，该怎样打包比较好呢？

正在此时，小笨同学指示了：“给我配一大堆箱子来，每个大小要一样，这些箱子的名字就叫做 RLC PDU（Protocol Data Unit，协议数据单元）吧。马上装货，马上发到调度中心，由他们给运输大队配送给用户”。

小新犯愁了：“小笨老大，货物来得不是很均匀，一会儿多一会儿少的，是不是定制各种不同规格的箱子啊。或者我们干脆不定制箱子，把这些东西直接拖上火车可好？”

小笨同学嗓门立即提高了 8 度：“是我笨还是你笨，定制各种不同规格的箱子成本多



高啊，哪有统一的箱子来得简单。”

“那来的货物多于一个箱子咋办，少于一个箱子咋办？”小新弱弱地问。小笨答道：“多于一个箱子，你不知道把货物分成较小的几部分啊，多放几个箱子就是了，这就是部门重要的一项工作，叫做‘**分段**’；到了客户那里，他们自然会把这些东西合并，叫做‘**重组**’。至于来的货物不够一个箱子，这还不简单，塞点泡沫填满就是了（填充一些比特），还可以减少货物损伤呢，这个叫做‘**填充**’”。“还有，你必须得理解定制箱子然后把东西进行‘分段’的意义。分段之后，到了配送中心（物理层），他们会给箱子里的货物加一段标注，说明是什么货物。客户开箱之后，如果发现货物不对，就可以要求我们重发这个箱子的货。保证所有货物都送到位，送不到位出现丢失的我们公司赔补（重发），这是我公司的服务承诺啊。你想啊，假设你不分段，直接拖一火车皮到客户那去，要是客户发现货物有丢失，又分不出到底丢失了多少，你怎么办，难道重发一火车皮过去吗？”

RLC 子层的一大任务就是实现点到点的数据可靠传输，这是数据链路层的主要任务。与其他通信系统一样，WCDMA 系统点到点的可靠传输也是通过将数据分段以及数据重传来实现。RLC 层把数据切成一小块一小块，每一块标注序号。到了物理层之后，物理层给每一个 RLC 的分块都添加 CRC 标识，到了对端那里，就可以通过 CRC 标识来检查这一块有没有错误，如果有错误，对这一小块进行**重传**即可。

“此外，还有一项重要的工作要做”，小笨仿佛又若有所思，顿了顿说：“对于一家物流公司而言，很关键的一点就是各种业务需要差别化对待，不能所有的业务一个标准。有些业务你要快快地送，在本部门除了分段往箱子里一塞，啥事情也不用管，这种叫透明模式（TM，Transparent Mode）；有些业务也要快，丢了也不用管，但是要有顺序，我们需要标注一下序号，这种叫非确认模式（UM，Unacknowledged Mode）；有些业务是一定要保证质量的，不能丢，这种不但要有序号，而且丢了一定要重传，这种叫做确认模式（Acknowledged Mode）。”如图 4.42 所示。

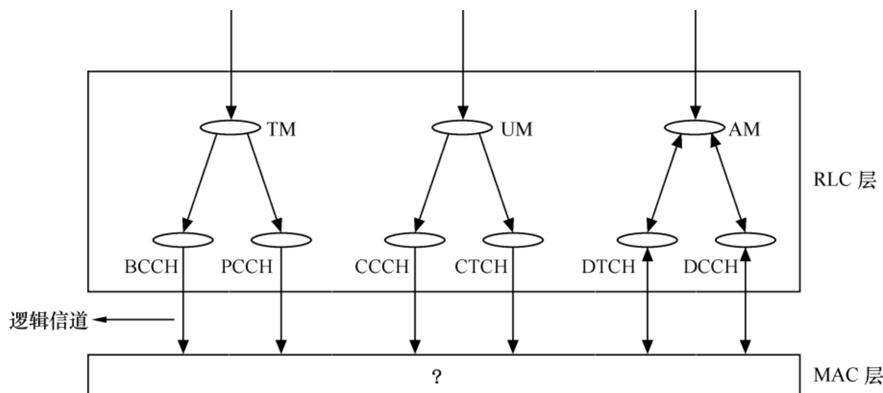


图 4.42　RLC 的 3 种传输模式 TM、UM、AM



小笨继续说道："除此之外，对于各种业务也需要分下类吧，比如本公司的宣传信息（BCCH 广播信息）、本公司寻找客户的信息（PCCH 寻呼信息），这类消息反正总是重复播放，丢了也无所谓。这类信息包装也不必要了，采用 TM 模式吧。然后这类消息都通过自己的专门通道送给调度科，这些专门通道叫做'逻辑信道'。像投递一些公共信息（CCCH、CTCH，比如随机接入、接入允许、小区广播等业务）的话，这类消息要求快速处理，不要在本部门耽搁了，就采用 UM 模式吧，加个包装（RLC 头）寄出去，收不收得到我就不管了。至于个人业务（DTCH、DCCH），对速度要求没那么高，但对于可靠性要求非常高，所以一定要采取 AM 模式"。

大家请注意，在图 4.42 中，AM 模式的箭头都是双向的，因为 AM 模式都需要和信息交互才知道哪个段的数据丢了，然后才好重新发送。

我们不妨用京东商城物流运输的一个实例来说明 RLC 层的工作，如图 4.43 所示。

订单跟踪	付款信息	订单轨迹
处理时间		处理信息

处理时间	处理信息
2011-5-15 16:10:27	您提交了订单，请等待系统确认
2011-5-15 16:16:18	您的订单已经进入武汉一号库准备出库
2011-5-15 16:21:55	您的订单已经打印完毕
2011-5-15 16:37:24	您的订单已经开始拣货
2011-5-15 16:38:09	您的订单已通过扫描确认
2011-5-15 17:30:32	您的订单已打包完毕
2011-5-15 19:06:20	上车扫描，您的货物已经从武汉库房出发，送往雨花区站途中

送货方式：　承运人：京东快递　货运单号：55200364

分段过程

货物怎能丢，显然是 AM 模式，添加序号

RLC 层工作

MAC 层工作，将货物发送给配送中心

图 4.43　京东商城的处理模式

在图 4.42 中，MAC 层的处理方式就像一个黑盒子一样，我们打了一个问号，接下来的小节我们就要来了解一下 MAC 层的工作。

4.4.2　调度确保资源高效利用

话说 RLC 层的小主管小新同学在小笨经理的教导下，日渐成熟，于是被调往 MAC 层担任部门经理。MAC 层与 RLC 层有着密切的业务联系，上级这样安排，也是有着良苦用心——希望小新同学能完成好 MAC 层和 RLC 层的对接。

事实证明，小新同学果然是小笨同学的好战友，刚上任就将 MAC 层划分为 3 大模块，实现和 RLC 层的全面对接，分别叫做 MAC-b、MAC-c 和 MAC-d。请注意了，这可并不是按字母排序，这几个名字都是有含义的，这些模块也是有作用的。我们看到图 4.42 中，RLC 层有 N 多逻辑信道，这些逻辑信道都需要 MAC 层的承接。

于是，MAC-b（broadcast）负责处理广播信道 BCH。MAC-c（common）负责处理公共信道，比如前向接入信道（FACH）、随机接入信道（RACH）、小区广播信道（CBCH）。MAC-d（dedicate）就是处理一些个人业务了。如图 4.44 所示。

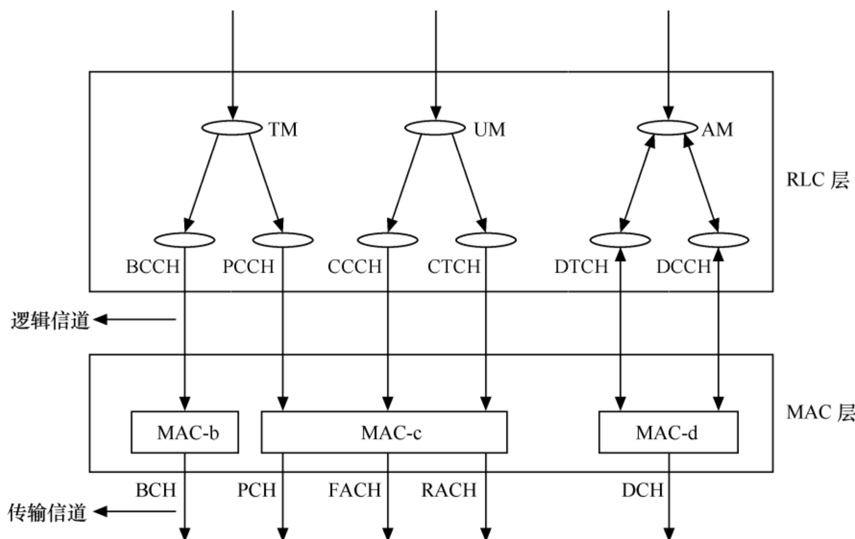


图 4.44　3 大 MAC 模块

小新完成了和 RLC 层的对接，转念一想，觉得还需要改进。逻辑信道和传输信道的对应关系太简单、太直接，对资源的合理利用没有做太多的考虑。BCCH 对应 BCH、PCCH 对应 PCH、CCCH 对应 FACH 和 RACH。

毕竟，RLC 层和 MAC 层是共同组成了数据链路层，数据链路层的主要功能，比如纠错、保证无错传输都被 RLC 层做了。MAC 层要是不能做出点什么成绩，那这个部门的作用就体现不出来了。MAC 层的价值可以体现在哪呢？当然是资源的调度。

要想提高资源利用率，肯定得从 MAC-c 这边想办法，因为只有这个模块传输公共信道数据，MAC-b 处理的是广播，MAC-d 处理的是专用信道，都没有共享数据的概念，榨不出油水。

而 MAC-b 中，RACH 是上行信道，我们知道，上行信道的资源是大大的丰富，不是当务之急。PCH 早就定义了只传递寻呼消息，其他啥也不干。下行只有 FACH 信道是个大杂烩，什么都可以传，因此想提高资源利用率，就得从它入手。

我们知道，手机进入某个小区后需要听该小区的小区广播，从而得到系统信息。但是小区的系统信息的改动是很少的，听完一遍完整的信息是否有必要继续听，继续解码呢？小新同学觉得没有必要，就决定只在小区广播的系统信息有修改的时候再听。问题是，既然不再持续监听 BCH 信道了，那怎么样才能知道系统信息发生了变化呢？这就需要对该



手机发起寻呼，让该手机接入通过 FACH 信道来接收系统消息。这样的话，BCCH 逻辑信道也就可以通过 FACH 传输信道来承接了，资源利用率得到了提高，如图 4.45 所示。

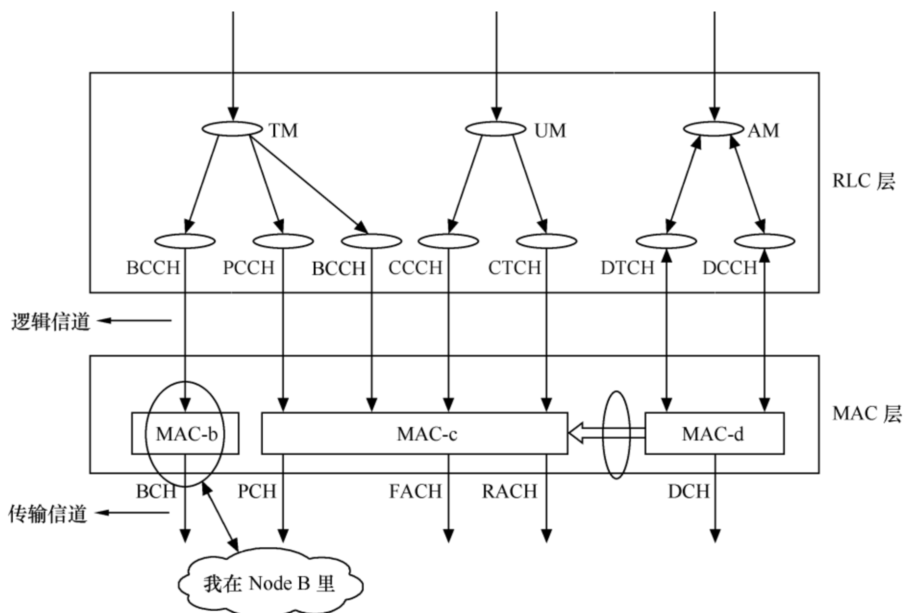


图 4.45　提高资源的利用率

大家在图 4.45 中看到，除了 BCCH 可以映射到 FACH 上之外，还有一个变化，那就是 MAC-d 的专用信道也可以通过公共信道来传输。利用的是哪些传输信道呢？自然是下行数据采用 FACH，上行数据利用的是 RACH 信道。

当然，并不是所有 MAC-d 的数据都可以用公共信道来承载，否则还需要专用信道做什么？首先，话音是肯定由专用信道来承载的，因为要保证质量和时效性，由一条专门的物理信道来承载比较好。其次，数据量大的业务也不能由公共信道来承载，因为 FACH 信道是映射到一个 $SF = 64$ 的 S-CCPCH 信道，信道容量只有 120kbit/s。考虑到信道编码至少要占到一半以上，那么真正用来传输数据的就不到 60kbit/s 了。所以，数据量高于一定的门限就需要采用专用信道，而不是通过公共信道来传输。这种按门限来启动信道的方式显然有它的好处，比如你上网挂挂 QQ、看看小说，那才多少流量，*N* 个用户一起共享 FACH 信道足矣。而想看点图片和视频的话，就那么一点信道容量，那大家就都没法用了，所以一定需要给用户单独分配信道。

在这里，我们还要注意一个问题。我们在图 4.41 中显示的是所有 RLC 层和 MAC 层都处于 RNC 中，实际上并不完全是这样的。MAC-b 其实是在 Node B 当中的，因为 MAC-b 是针对小区而非用户的，广播信息和每个小区是一一对应的，所以放到 Node B 中更方

便。而 MAC-c 和 MAC-d 中的信道都是针对用户的，由于 CDMA 软切换的特性，这些用户可能同时和好几个小区进行着连接，所以放到 RNC 中比较方便。

到这里为止，WCDMA 的最初版本，R99 的内容我们就介绍完毕了。我们描述了 R99 的网络结构和空中接口的物理层、MAC 层及 RNC 层。R99 是从 2G 迈向 3G 的第一步，但是 R99 的上下行速率、往返时间等方面依然不能令人满意，这就催生了 HSDPA 和 HSUPA。

4.5 少年 WCDMA 之烦恼四— 如何应对流量飙涨

到 4.4 节为止，一个完整的 WCDMA 算是蔚然成型了，这个最初的版本也取名叫 R99。在今后的几年中，这个初长成的少年被运营商寄予厚望，在 3G 牌照拍卖的时候频频拍出高价；同时，它也遇到了很多烦恼，由于终端的不成熟、下载上传速率没有太大的改善、盈利模式不清晰等一系列原因，在世纪之交高价拍得 3G 牌照的那些运营商在 3G 运营上几乎无一例外陷入亏损的境地，这也使得业界普遍开始怀疑，3G 能不能赚钱，WCDMA 到底行不行？

就在这样的压力和质疑下，R5 和 R6 版本相继推出，并将在未来的几年里彻底改变人们对于 WCDMA 的印象。

概括起来，R99 的关键问题还是承载数据业务的能力不够，一旦数据业务上量上规模，它的麻烦和烦恼就来了。那么，究竟是哪几个方面的问题限制了 R99 承载数据业务的能力呢？

其一，DPDCH 信道独享性与数据业务突发性的矛盾。在 R99 中，下行链路建立了链接之后，其扩频因子就不能更改。假如给一个用户分配了一个 $SF = 8$ 的码资源（信道速率 960kbit/s），而实际上由于数据业务的突发性，其流量是忽大忽小的，很多时候这个码资源都得不到充分利用。资源得不到充分利用又不能释放，那么就必然会影响其他用户的正常接入，从而降低了小区的业务容量。

其二，较差信道质量与较高速率的矛盾。在 R99 中，当用户处于小区边缘且速率较高的时候，为了保证用户的接收质量，那么基站不得不加大发射功率，从而消耗过多的功率资源，将会影响整个小区的下行业务容量。

话说起来，互联网被分为 Web1.0 时代和 Web2.0 时代，Web1.0 时代以新浪、搜狐、网易这些门户网站为代表，这些网站有点像传统媒体的网络版。主要特征就是它们说我们看，人民群众并不是发布新闻和视频的主体，在网络上体现的特点就是下行数据流量激增，而上行流量的增长曲线要平滑得多。当我们开始更多地用手机接入互联网而不仅仅是通过电脑来接入网络的时候，那么移动网络的下行流量也会飞速增长，传统的 R99



网络面对这样的挑战显得有点捉襟见肘，就这催生了 HSDPA。

Web1.0 还方兴未艾，Web2.0 时代又悄然来到。Web2.0 强调每个用户的参与性，强调分享、交友、互动等理念，在国外以 Facebook、Twitter 和 Youtube 为代表，在中国以新浪、腾讯微博、Youku、人人网、天涯为代表。大家可以很清楚地看出 Web2.0 和 Web1.0 的区别。Web1.0 网站是所有信息的来源，而用户只是信息的受众，所以造成下行链路数据流量激增而上行链路数据流量变化相对比较平缓。到了 Web2.0 时代，网站本身一般只负责运营和管理，上面的新闻也好、视频也罢，基本都是用户自己传上去的，这就导致了上行流量的爆炸性增长。随着 Twitter 和微博的兴起，在移动网上这种趋势也越发明显，这使得原本显得有点鸡肋的 HSUPA 也开始焕发强大的生命力。

4.5.1 "Web1.0 时代"— HSDPA

由于下行功率以及码资源利用率的问题，R99 在承载数据业务时遇到了"瓶颈"。于是，HSDPA（High Speed Downlink Packet Access，高速下行分组接入）应运而生。在 HSDPA 中，采用了多种技术来提高空中接口的速率，我们来看看有哪些方式。

1. 码资源共享

首先要解决的是码资源利用率的问题，在 R99 中，用户上网的时候独占一条信道资源，而在 HSDPA 中，引入了共享的概念，如图 4.46 所示。

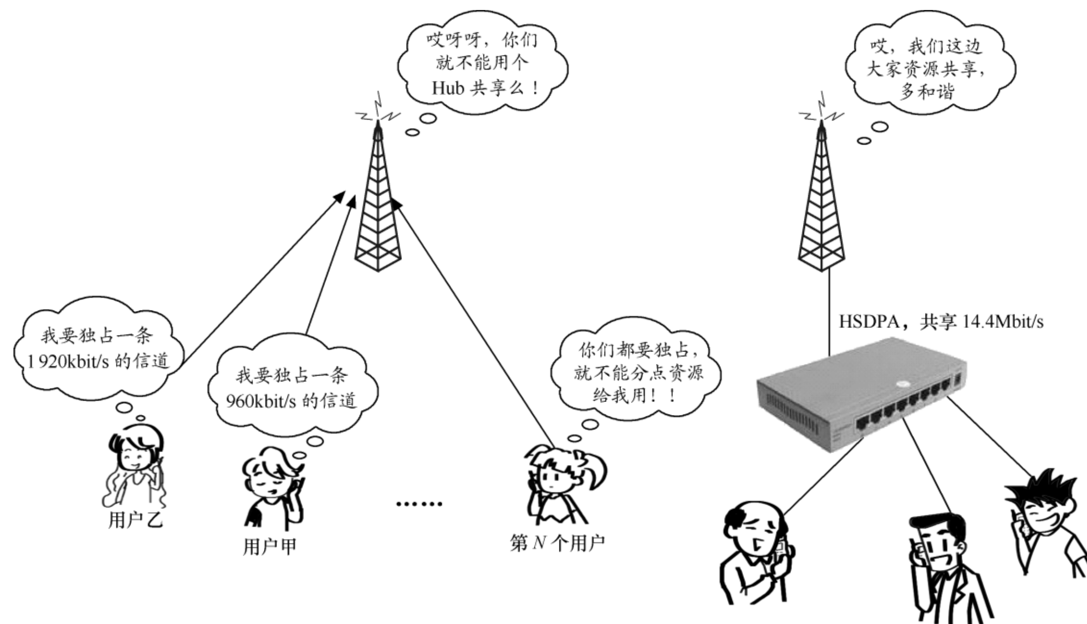


图 4.46　HSDPA——码资源共享

HSDPA 把 *SF* = 16 的 16 个码字拿出来，其中 1 个用于公共信道，另外 15 个用于大家共享。这 15 个信道在物理层也叫做 HS-DSCH 信道（High-Speed Downlink Shared CHannel，高速下行共享信道），专门用于下行。

可能有人要问为什么采用的是 15 个 *SF* = 16 的码字，大家可以参见图 4.34，*SF* = 16 的码字有一个在图中已经变成了灰色，所以只剩下了 15 个。

图 4.47 揭示的是 HSDPA 中 15 个码字的共享方式，大家可以看到，HSDPA 相对于 R99 有几个不同。第一，扩频码是固定的，都是 *SF* = 16，不像 R99 下行从 4～512 皆有可能；第二，信道是可以共享的，这样当某个用户数据量不大的时候，就可以释放信道资源给其他用户用，从而提高资源的整体利用效率。

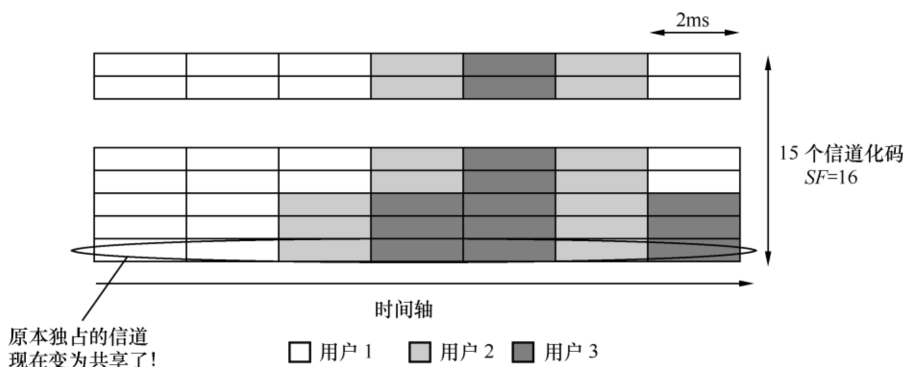


图 4.47　HSDPA 码资源共享方式

2. 快速调度、自适应编码、高阶调制

我们在图 4.47 中也可以看到，TTI（Transmission Time Interval，传输时间间隔）的间隔由 R99 的 10ms 缩短为 2ms，也就是相当于原来 15 个时隙发射一次数据，现在 3 个时隙发射一次数据。由于无线环境是快速变化的，采用更短的传输时间间隔有利于无线网络根据无线环境的变化快速调整参数，从而更充分地利用网络资源，并为我们下面所说的自适应编码打下基础。除此之外，采用更短的传输时间间隔还有一个好处，就是可以缩短往返延时，这对魔兽世界、反恐精英等交互类游戏有着重要意义，在这类游戏中，传输的时延直接影响终端用户感知。R99 的数据业务的往返时延约 150ms（如图 4.48 所示），而 HSDPA 的往返时延可以低于 100ms。

```
Pinging sina.com.cn [202.108.33.60] with 32 bytes of data:

Reply from 202.108.33.60: bytes=32 time=158ms TTL=244
Reply from 202.108.33.60: bytes=32 time=140ms TTL=244
Reply from 202.108.33.60: bytes=32 time=145ms TTL=244
Reply from 202.108.33.60: bytes=32 time=145ms TTL=244
```

图 4.48　R99 典型往返时延

自适应调制编码（AMC）又称为快速链路匹配，乍一看这两个词离得有点远，其实是一回事。所谓快速链路匹配，就是根据当前的信道状况，不断改变调制方式



和编码率，为用户分配最佳调制方式和编码速率。比如信道质量好的时候，基站就可以选择使用 16QAM 的调制方式；而当无线环境不佳的时候，就可以调整为采用 QPSK 编码。那么信道质量该采用什么方式评估呢？我们在很多地方都提过了，是采用信噪比 *C/I* 来表示。

请注意了，在下行引入 16QAM 也是 HSDPA 的一项重大举措，这可以使得在同等扩频码的情况下下行的峰值速率提高一倍，如图 4.49 所示，在 QPSK 里一个点位只能对应 2bit，而在 16QAM 里面一个点位能对应 4bit，所以能使得速率提高一倍。不过硬币总有正反两面，大家也可以看到，16QAM 的点位比 QPSK 要密得多，这使得 16QAM 的抗干扰能力相对 QPSK 要弱，从而只适合在信道质量比较好的时候使用。

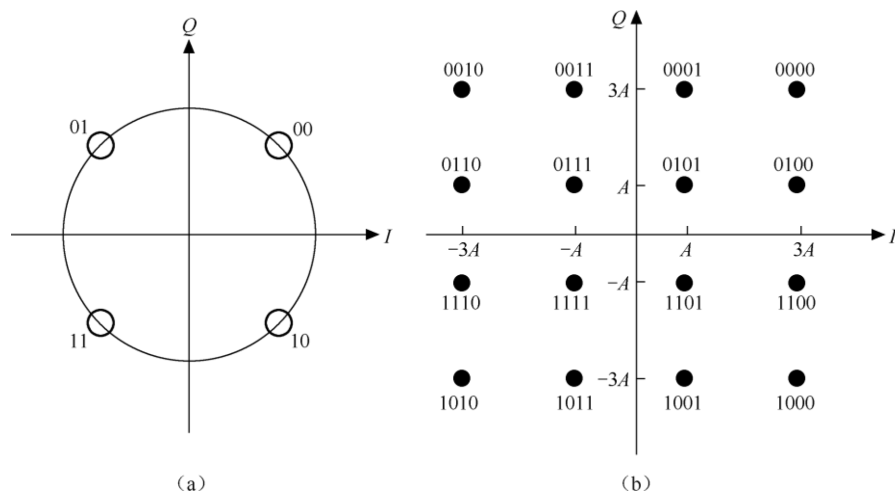


图 4.49　QPSK 和 16QAM 对比图

3. 混合传输 ARQ（Automatic Retransmission reQuest，自动重传请求）

我们在 RLC 层那一小节里已经提到过，所谓 ARQ，就是物理层通过 CRC 检错之后上报 RLC 层，由 RLC 层进行重传。这种方式在 HSDPA 中可以沿用吗？有什么问题？我们不妨来看看图 4.50，对比一下 R99 和 HSDPA 的重传方式。

R99 和 HSDPA 下行数据都是从 RNC 发送到 Node B，但一旦检测出数据错误，重传方式就不一样了。在 R99 中，UE 检测出数据错误，于是回送一个 NACK（None ACKnowlegdement，非确认）数据告诉 RNC，由 RNC 下发重传数据。而在 HSDPA 中，NACK 数据发送给 Node B，由 Node B 重传就可以了。从图 4.50 中可以看出，HSDPA 重传不再需要与 RNC 交互，响应速度快了很多。

值得注意的是，在 ARQ 前面还有混合两个字，这是什么意思呢？所谓混合，说明重传方式不止一种，一种称为软合并模式，也就是将数据完整地再传一遍，然后将两次

传输的数据合并；第二种称为递增冗余模式，也就是只传一部分有问题的数据。

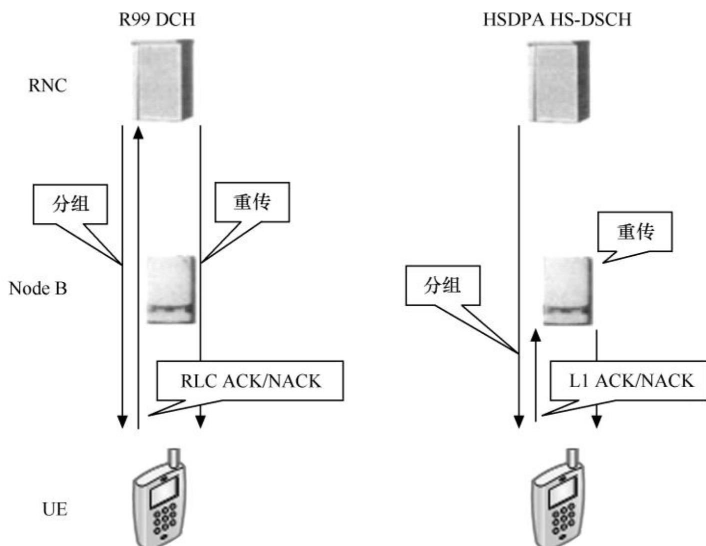


图 4.50　R99 和 HSDPA 重传方式对比

我们知道，原来在 Node B 中除了物理层以外就只有一个 MAC-b 子层，MAC-b 的功能就是发送广播信息，其他的事情都干不了。如果要支持混合 ARQ 功能的话，那么无非就是两条途径，一是修改 MAC-b 的功能，二是新增一个实体来满足这些需求。修改 MAC-b 显然不是一个好主意，因为 R99 版本已经固化，而且早已在网上运行很久了，遍地都是 R99 的手机，你总不可能去把这些手机的操作系统版本都重新升级一遍吧。所以，从继承性和改动最小的角度出发，在 Node B 中增加一个新的实体来处理这些事情来得比较方便，实际上，现网也是这么处理的，HSDPA 在 Node B 里增加了一个 MAC-hs 的实体，由它来负责混合 ARQ 功能和调度机制，如图 4.51 所示。

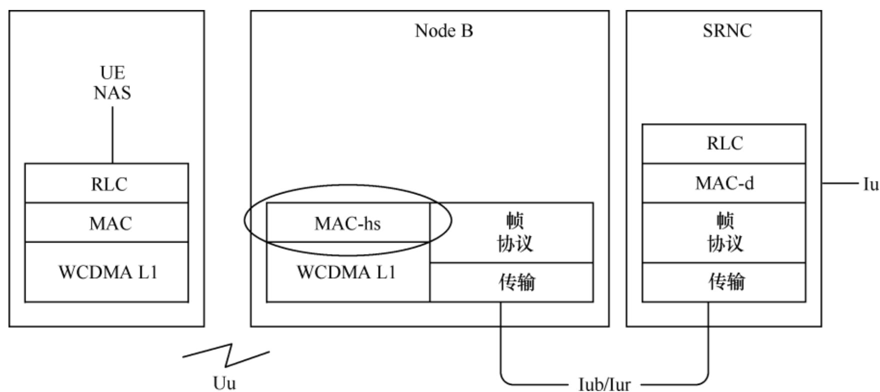


图 4.51　MAC-hs 实体



4.5.2 “Web2.0 时代”— HSUPA

如果大家喜欢上网查询手机的各项性能参数从而决定选购哪款手机的话，那么可能就会发现不少手机的标注中已经是“下行 7.2M，上行 384k”或者“下行 3.6M，上行 384k”。大家或许很奇怪，这个 384kbit/s 是从哪里来的？

虽然 R99 协议规定了上行可以多码并行传输，但出于成本考虑，现网应用的终端在上行链路上从来就不是多码传输的，而是普遍只支持一个上行 DPDCH 物理信道。

我们知道，上行链路扩频码的变动范围是从 4～256，就算只使用一个为 4 的扩频码，其信道的比特速率也是 3.84Mbit/s/4 = 960kbit/s，而不应该是 384kbit/s 啊？实际上，这 384kbit/s 指的是实打实的用户数据，是剔除了信道编码冗余后的纯数据，不像下行 7.2Mbit/s 或 3.6Mbit/s 那样宣称的是信道编码后的速率。

随着 SNS 网站的兴起，如微博、人人网、51，以及随着 Youku、Tudou 等视频网站越来越流行，Web2.0 时代正悄然兴起。与此同时，手机摄像头的像素也不断提高，人们可以很方便地随时随地用手机拍摄视频传到微博上，和自己的朋友以及粉丝们分享自己的所见所闻。384kbit/s 的带宽应对这样的变化与挑战显然是有点捉襟见肘的。有时候你不得不佩服那些 3GPP 领路人们的洞见，要知道 R6 版本在 2003 年就冻结了。那个时候 youtube、facebook 以及 twitter 还不知道在哪里呢，要在那个时候预料到后来的上行流量的爆炸性的增长恐怕不是一件容易的事情。

我们在上一小节中已经讲述了种种提高下行速率的方式，其实很多方式在上行方向都可以如法炮制。下面我们就来介绍一下 R6 版本对于上行速率提高的方式，这就是 HSUPA（High Speed Uplink Packet Access，高速上行分组接入）。

1．多码传输

显而易见，要提高上行的速率第一个要解决的问题就是实现多个码并行传输，否则只有一个码可以用的话，而想提高速率纯属不可能。出于继承性和改动最小的考虑，HSUPA 并没有在原来上行信道 DPDCH 做什么改动，而是新增了一条信道，叫做 E-DPDCH（Enhanced Dedicated Physical Data CHannel，增强型专用物理数据信道）。每当有新的技术出现的时候，总是伴随着新增的信道，这在移动通信中几乎成了一条规律，在 GPRS/EDGE 中如是，在 HSDPA 中如是，如今在 HSUPA 中又如是。E-DPDCH 实现上行并码传输之后，并行 6 个码就可以达到上行速率 5.76Mbit/s，具体是怎么得出这个速率的，在这里不再加以解释，读者可查阅其他相关图书或技术资料。

2. 调度与重传

HSUPA 和 HSDPA 调度主体相同，都是 Node B 来给各个手机分配资源。但是调度的资源又不一样，在 HSDPA 中，调度的资源是调制方式、码字数量，而在 HSUPA 中，调度的资源是扩频因子和功率。我们来对比一下这几种调制方式的不同。

在 HSDPA 中，是可以根据信道质量将调制方式在 16QAM 和 QPSK 之间切换的；而 HSUPA 中，并不打算修改调制方式，因为上行的数据流量本来就小于下行，5.76Mbit/s 就可以了，没有必要用高阶的调制方式。直到到了后续演进阶段 HSPA+，下行采用 64QAM 调制后，上行才开始采用 16QAM 的调制方式。

除此之外，HSDPA 中这种通过分配码个数的方式来调节各手机的速率的方式在 HSUPA 中也没有必要。在上行链路中，一个手机就有一棵码树资源，码资源充分得很，显然不需要通过限制码资源数量来调节速度，而是依然沿用 R99 里通过调节扩频因子来调节速率的方式。

再者，HSDPA 是没有功率控制的，而 HSUPA 依然有功率控制。因为在上行方向，最大的麻烦依然是干扰问题，需要通过功率控制来防止“远近效应”。

我们从图 4.52 中可以看到，HSUPA 调度的主体依然是 Node B。在 HSDPA 中，采用 Node B 来调度不会有什么问题，因为 Node B 本身就是数据的发送方，所以这个过程会很快。而在 HSUPA 中，Node B 是数据的接收方，这样在进行调度的时候就不可避免有一定的延时，从而使得跟踪用户瞬时信号并及时调度变得要困难。

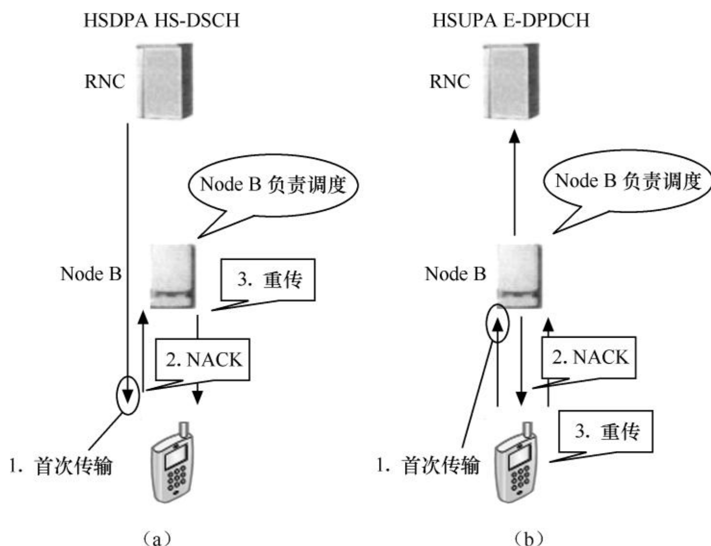


图 4.52　HSUPA 和 HSDPA 调度及重传方式对比



HSUPA 的重传和 HSDPA 没有太多区别，不过是发送方和接收方刚好反过来了而已。

3. 增加功能实体

在 HSDPA 中，为了实现快速调度和混合 ARQ 功能，在 Node B 中增加了一个 MAC-hs 实体。而在 HSUPA 中，为了实现这些功能，也在 Node B 中增加了一个 MAC-e 的实体。而手机上传的数据同时被多个 Node B 接收，RNC 需要对这些数据进行一下排序，因此就需要在 RNC 中增加一个功能实体来处理这件事情，这个功能实体叫做 MAC-es，如图 4.53 所示。

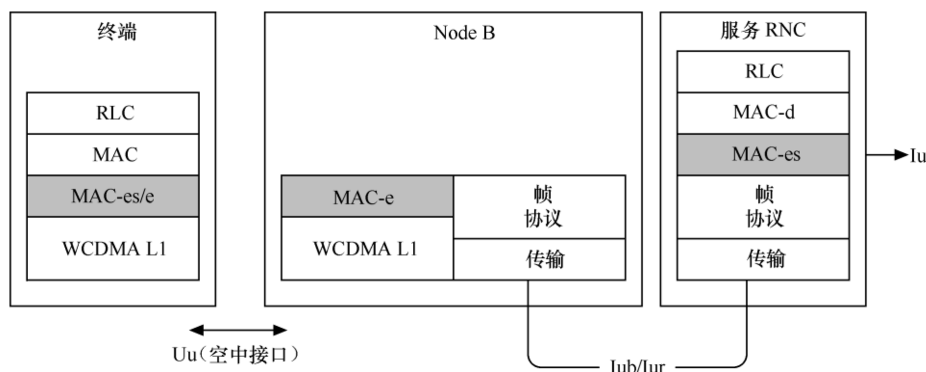


图 4.53　HSUPA 新增实体结构

我们在上面看到，HSUPA 通过并码传输、快速调度与重传等方式实现了上行速率的提高。上下行在实现 HSDPA 和 HSUPA 后其峰值速率分别达到了 14.4Mbit/s 和 5.76Mbit/s，看起来已经蛮快了，好像可以满足现网需求了。但随着 WiMAX 的崛起，HSPA 不得不继续向前演进，以应对新的挑战，这就是 HSPA+。

4.5.3　无线宽带再提速— HSPA+

如果没有 WiMAX 的横空出世，LTE 和 HSPA+或许还不会这么快就出现。本来在 HSPA 和 IMT-Advanced（可以理解为 4G 技术）之间，是没有规划做 LTE 的。但 WiMAX 的出现打破了这一格局，为了应对 WiMAX 的挑战，也为了实现无线的宽带化，支持 3GPP 的厂家不得不团结起来快速跟进标准，并开始努力推动 UMTS 技术的演进版本——LTE。LTE 的工作是革命性的，它取消了重要的网元——RNC，并要求核心网也同步演进。一部分设备厂家和运营商出于保护投资的目的，不希望一下子进行这么大的变革，于是就有了 HSPA 的演进，也称为 HSPA+。我们也来看看 HSPA+都有哪些关键技术。

1. 高阶调制

想提高传输速率，最简单的办法往往就是采取更高阶的调制。HSPA+在下行信道质量好的时候可以采用 64QAM，而在上行信道质量好的时候可以采用 16QAM，如图 4.54 所示。

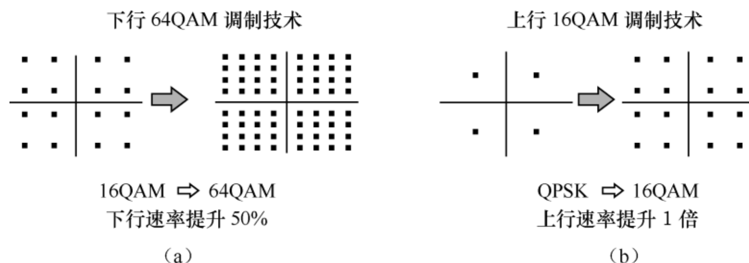


图 4.54　高阶调制

从 16QAM 到 64QAM 能提升多少速率不难算出来，原来 16QAM 的时候，一个点位可以表示 4 个比特，$2^4 = 16$。现在采取 64QAM，一个点位可以表示 6 个比特，$2^6 = 64$。速率相对于原来可以提高 6/4 = 1.5 倍。也就是说下行的峰值速率可以提高到 14.4Mbit/s × 1.5 = 21.6Mbit/s。现在联通宣称的下行速率 21Mbit/s 就是这么得来的。

我们不妨这样来理解调制方式的改变对容量的影响。以前 HSDPA 采用的是 4 吨的货车（16QAM），现在用的是 6 吨的货车（64QAM），因此运输能力可以提高到原来的 1.5 倍。

上行方向速率的提升大家不难由相同的方式计算出来。

2. MIMO

我们从字面意思就不难看出，MIMO（Multi Input Multi Output）基于的是无线信号的多路发射与接收。现网用的比较多的是双发双收，两根天线采用同一个频点，复用同样的信道化码，但是每根天线上走的不同的数据流，通过多通道的传输也可以使得一个载波内发送的业务量翻番，如图 4.55 所示。

这就好比原来有一条路，在路的上方又叠加一个高架桥，那么通道增加了，车流量也可以增加一倍。

3. 多载波技术

为了能进一步提高单个用户数据业务的最高速率，HSPA+技术最后借助一个用户捆绑多个频点的方法，如图 4.56 所示。在 R8 和 R9 中采用的是捆绑两个载波，也就是单



用户可以使用 10MHz 的带宽。而到了 R10 能支持捆绑 4 个载波，也就是单用户可以使用 20MHz 的带宽，与 LTE 的最大带宽一致。

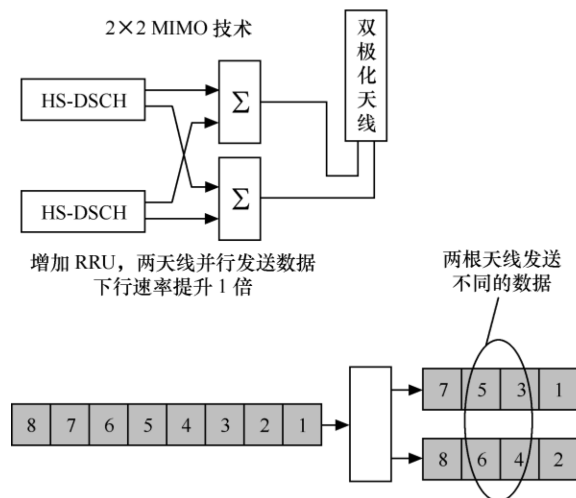


图 4.55　MIMO 技术

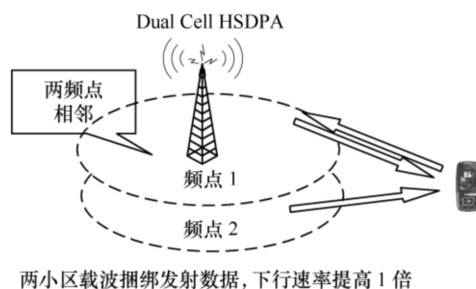


图 4.56　多载波技术

这就好比一条 5 车道的路（类比 WCDMA 的 5MHz 带宽），用着用着发现这条道路的吞吐量不够了，就在旁边再修一条 5 车道的路，从而使得吞吐量可以扩大一倍。当然，旁边新修的道路可以相邻也可以不相邻。

至此，HSPA+技术大体就介绍完了，关于 HSPA+，对于其下行速率有多种宣传，我们很容易就能计算出这些数据是怎么来的。

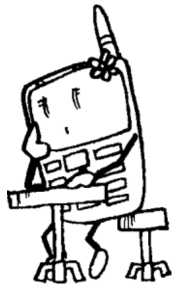
（1）下行速率 21Mbit/s：下行采用 64QAM 调制技术，速率提高 50%，14.4Mbit/s × 1.5 = 21.6Mbit/s。

（2）下行速率 28Mbit/s：下行采用 MIMO 或多载波技术，速率提高 1 倍，14.4Mbit/s × 2 = 28.8Mbit/s。

（3）下行速率 43.2Mbit/s：下行采用 64QAM 调制技术，同时采用 MIMO 和多载波调制技术，14.4Mbit/s × 1.5 × 2 = 43.2Mbit/s。

第5章

Chapter 5



TD-SCDMA，中国造

如果你对WCDMA已经比较熟悉了的话，那么你学习起来TD-SCDMA也会得心应手。为什么这么说呢？

首先要说的是各种无线通信技术标准都有着几乎相似的架构，从GSM到WCDMA，乃至TD-SCDMA和cdma2000，都有着近乎相同的网络结构。很多设备的功能都差不多，只是在不同的技术标准里名字叫法不一样。这一点并不奇怪，因为出于传承和演进的考虑，通信的大框架在变化上一般而言是比较小的，所以各种技术标准的基本结构的差异不会特别大。技术的变革往往发生在最容易带来收益的那一块，比如说空中接口，而不会随意去进行整体的、深刻的变革，因为那样的代价太大，从成本收益比上来看不太划算。

其次是WCDMA和TD-SCDMA源于同一个标准化组织——3GPP（3rd Generation Partnership Project，第三代合作伙伴计划），同一个标准制定的两种不同标准，如果彼此之间差异太大，那么除了把自己累死之外没有太多别的好处。

因此，本书把WCDMA放在前面，浓墨重彩地介绍得详细一点，读者对于WCDMA有了足够的理解之后，再来学习TD-SCDMA就可以事半功倍。在介绍具体的技术之前，让我们先来简单地了解一下TD-SCDMA诞生的来龙去脉，这样可以让我们对TD-SCDMA在中国的运营有更深刻的了解。

5.1 从中国制造到中国创造— 谈谈TD-SCDMA的发源

大家或许对一张图都很熟悉，那就是微笑曲线，如图5.1所示。微笑曲线的两端“研发与营销”代表着高利润与高附加值，而处于中间的制造则只有微薄的利润。中国是一个制造业大国，我们也一度为此而自豪，随着经济的发展和人们生活水平的提高，越来



越多的中国企业发现要有更多利润，要做大做强就必须将产业向微笑曲线的两端转移。

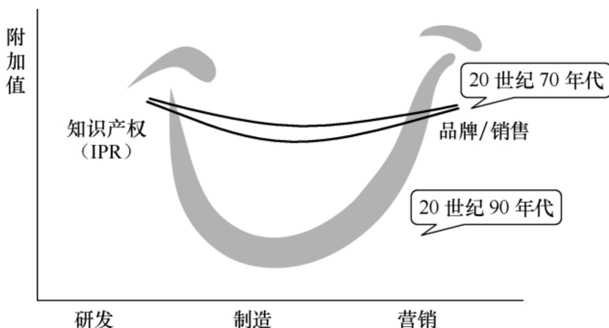


图 5.1　微笑曲线

在这样的局面下，国家开始进行整体战略迁移，开始强调创新，开始强调自主知识产权。神六、大飞机、高铁、TD-SCDMA 都是在这样的大背景下开始飞速成长。

为什么微笑曲线从 20 世纪 70 年代到 90 年代发生了这样大的变化，中国企业又为什么需要关注专利与标准呢？在这里，引用一段华为总裁任正非的文章《华为的愿景、使命与战略》。

“在火车、轮船发明后，产生了工业经济，由于金融的载体作用以及产品的远距离运输，使资本主义成为可能。在航空器发明后，工业经济加速发展，到 20 世纪 70 年代末达到了高峰。那时的经济是以核心制造为中心的工业经济，经济的附加值主要在产品的制造上。那时，日本、德国的经济达到了顶峰。后来由于处理器（CPU）的发明，计算机开始普及，又由于光传输的发明与使用，形成了网络。由于网络及管理软件的应用，使制造可以被剥离，并转移到低成本的国家，而且制造不再有高的利润。发达国家正在从工业化走向去工业化，从而导致核心制造时代结束。20 世纪 90 年代，日本、德国开始衰落，美国开始强盛。这时主要附加值的利润产生在销售网络的构造中，销售网络的核心就是产品的研发与 IPR（专利）。因此，未来的企业之争、国家之争就是 IPR 之争，没有核心 IPR 的国家，永远不会成为工业强国。”

……

“由于制造可以被剥离出来，销售与服务可以贴近市场，它们之间的关联可以通过网络来进行，经济的全球化不可避免。”

……

“网络的存在使得经济全球化是不可避免的，不仅对于我们华为是不可避免的，实际上是世界所有国家都不可避免的。因此，这个时候希望封闭起来不要走全球化的道路，实际上是错的。这个时候必须勇敢地面对全球化，发挥自己国家的优势，为自己争取更多的机会。经济全球化的核心是什么？过去的经济竞争的核心是战争；20 世纪 70 年代、



80年代是工业制造，是关税、许可证及配额贸易。这个时代是什么呢？由于网络的发明，市场和制造相分离，这个世界最重要的市场手段是IPR，没有核心IPR的公司在国际市场上，被法律排斥。承担制造的企业是不能随意卖出产品的，这就是IPR之争。台湾工厂靠代工，主要靠大规模的生产、大规模的采购，降低了采购成本，降低了制造成本，他们获得的利润大概毛利只有百分之三到百分之五；由于高科技IPR，使产品的毛利有可能达到百分之四五十或百分之五六十。因此将来的市场竞争就是IPR之争，就是未来的企业之争。所以将来没有核心IPR的国家，永远不会成为工业强国。”

上述文字讲述了一个核心问题，专利由于知识产权保护可以构成企业的壁垒，销售与服务由于贴近市场可以构成壁垒，而制造由于网络的诞生可以剥离，全球的生产企业为了订单要进行激烈角逐，这是一场没有壁垒的自由竞争，带来的必然是制造的低利润。因此，中国企业要获得更好的生存空间，不可避免要向微笑曲线的两端布局。具体到通信产业上，也就是必然要向“制定通信标准”这一价值链的顶端延伸。

5.1.1 破局— TD-SCDMA草创

多少年来，围绕TD-SCDMA的争论一直没有中断过，但是究其根本无非就是一点——通信方面的自主创新其代价是巨大的，其成本是高昂的，TD-SCDMA究竟能给我们带来什么？

就宏观层面而言，从移动通信产业占信息产业的比重、分量以及它的发展趋势来看，其在国民经济中已完全居于战略性支柱产业的地位。对标准制定的控制、主导以及话语权，实质上是对自己未来发展战略的选择，更是对未来市场竞争优势的争夺。

就微观层面而言，TD-SCDMA带给我们的无外乎两个方面，一是TD-SCDMA标准及其产业化发展的直接结果，它包括人才、技术、产品、网络、服务等，这些是有形的、可见的东西；二是创新活动本身的曲折历程带给我们的启示、经验和教训，这些无形的、不可见的东西不仅是当前中国企业所缺乏的，也是中国走向工业强国的必经之路。

在这样的背景下，1998年国际电信联盟（ITU）向全球征集3G无线传输方案，当时的电信科学技术研究院在信息产业部的支持下，代表国家向ITU递交了TD-SCDMA技术标准候选方案。应当说在提交方案之初，TD-SCDMA相对其他两大标准还显得非常单薄与势孤。

其一，当时国外提交的技术方案已经有了将近十年的研究和技术积累，关键技术已经完成了开发验证，并有了可供演示或测试的实证系统，技术规范、专利保护已相当完备，而我们的方案还处在原理验证、计算机仿真阶段。尽管此前电信研究院有过SCDMA无线接入技术的研究，但其距3G移动通信需求定义还相去甚远。



其二，TD 方案几乎是电信科学技术研究院独自研究，并在中国相关部门和运营商的支持下，去参与国际 3G 标准之争，只是到了方案融合阶段，才有个别国际合作，而国外每一个技术方案的背后都形成了运营商、制造商联合及政府支持的强大阵营。

其三，最终成为 3G 另外两个国际标准的 WCDMA 和 cdma2000，都有全球性的 2G 产业和网络运营为依托，它们最大的卖点是所谓的“平滑演进”。只有 TD-SCDMA 是横空出世，意图在 3G 产业的发展上成为一支新军。

其四，无论是 WCDMA 还是 cdma2000，都已建立了完整的产业链，据不完全统计，当时全世界仅从事 WCDMA 开发的公司达上百家，从事开发的人员就不下 10 000 人，一些主要设备公司的投入已高达 10 亿美元以上；相比之下，国内从事 TD-SCDMA 研究与开发的人才几十个，年投入不过几百万元人民币，产业链更是一片空白。

正因为如此，当年 TD-SCDMA 从实验室走出来，并最终成为国际标准的历程才显得格外艰辛。而 TD-SCDMA 最终成为国际标准，不得不说中国经济的快速发展和在通信领域的迅速崛起是其中的关键因素之一。

5.1.2　移动通信标准背后的无形之手

在 TD-SCDMA 的发展历程中，除了企业谋求向产业链的制高点延伸的努力以外，政府这只有形的手也在有力地推动 TD-SCDMA 向前发展。比如把 TD-SCDMA 给了实力最为雄厚的中国移动来运营，让 TD-SCDMA 提前于其他标准试商用，给了最多的频谱带宽，在政策性补贴上给予倾斜，等等。对此，总有一些利益集团以市场经济为由，对此进行种种非议，鼓吹把 3 大标准一碗水端平来进行竞争。

其实政府支持某一项通信标准的例子并不鲜见，翻开通信的史书就可以发现，在移动通信标准这种战略性的产业上面，从来就不是完全的市场经济，其背后都有诸多政治、经济的因素。

就 GSM 来说，没有欧盟及其成员国给予的政治支持和由欧洲运营商所组成的“谅解备忘录协会”的全力推动，GSM 只怕不会形成今天这样大的气候。早在第一套 GSM 规范发布的 4 年之前，GSM 计划就获得了欧盟委员会的认可。在 1986 年 11 月召开的欧盟委员会会议上，又正式形成了一封 GSM 推荐信和一份指示性文件，推荐信对 GSM 进行了详细介绍，正式表明了欧盟对它的支持；指示性文件则确保了每一个成员国都要保留首次演示所需的 900MHz 频带。这些都极大地激励了整个行业对 GSM 终端和基础设施的开发，从而促成了 GSM 的最终成功。

美国为推广自己的 CDMA 技术更是不遗余力。当还只是一家小公司的高通爆冷门地提出一种基于码分多址技术的系统时，GSM 系统已经在世界范围内拥有 130 万用户。尽管如此，美国 CTIA（蜂窝电话工业协会）还是在 1993 年采用了这项本土技术。但最初

支持高通 CDMA 技术的仅有一家美国设备供应商——摩托罗拉。通常说来，像 IS-95 这样一项进入市场晚，又是单厂商支持的技术，商业成功性很低。但美国官方坚信 CDMA 在容量上的理论优势，不仅坚决支持并资助该标准，鼓励在美国本土这个世界上最大的移动通信市场上采用 CDMA，还鼓动美国的设备制造商和进入北美市场的外国供应商支持 CDMA 技术，并大力说服南美洲和亚太地区使用 CDMA 技术，使其成为一项国际使用的标准。此外，北美在频率分配上也很具倾向性。1994 年之前，由美国 FCC（联邦通信委员会）决定的可分配频率中并没有为 GSM 留一席之地，GSM 技术若想进来，只能在 1994 年把保留给 PCS（个人通信系统）的 1 900MHz 频率清理出来之后。正是因为美国政府采取的这一系列措施，CDMA 最终实现了在北美和亚太地区等地的广泛应用，成为继 GSM 之后的全球第二大移动通信系统。

从以上事例可以看到，对于移动通信这样一个全球性战略产业的自主创新，如果没有政府的支持、推动和统筹，是不可能取得成功的。所以中国选择强力支持和推动自主通信标准，实在是一件符合国际惯例而无可置喙的事情。

5.1.3 TD-SCDMA 标准发展概述

TD-SCDMA 的发展过程始于 1998 年初，在当时的邮电部科技司的直接领导下，由原电信科学技术研究院组织队伍在 SCDMA 技术的基础上，研究和起草符合 IMT-2000 要求的我国的 TD-SCDMA 建议草案。

该标准草案以智能天线、同步码分多址、接力切换、时分双工为主要特点，于 ITU 征集 IMT-2000 第三代移动通信无线传输技术候选方案的截止日 1998 年 6 月 30 日前提交到 ITU，从而成为 IMT-2000 的 15 个候选方案之一。ITU 综合了各评估组的评估结果。在 1999 年 11 月赫尔辛基 ITU-RTG8/1 第 18 次会议上和 2000 年 5 月伊斯坦布尔的 ITU-R 全会上，TD-SCDMA 被正式接纳为 CDMA—TDD 制式的方案之一。如图 5.2 所示。

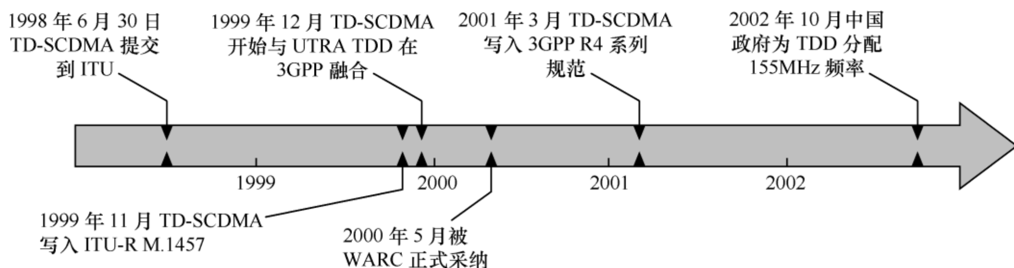


图 5.2 TD-SCDMA 标准发展关键历程

CWTS（中国无线通信标准研究组）作为代表中国的区域性标准化组织，从 1999 年 5 月加入 3GPP 以后，经过 4 个月的充分准备，并与 3GPP PCG（项目协调组）、TSG（技



术规范组）进行了大量协调工作后，在同年 9 月向 3GPP 建议将 TD-SCDMA 纳入 3GPP 标准规范的工作内容。1999 年 12 月在法国尼斯的 3GPP 会议上，我国的提案被 3GPP TSG RAN（无线接入网）全会所接受，正式确定将 TD-SCDMA 纳入到 Release 2000（后拆分为 R4 和 R5）的工作计划中，并将 TD-SCDMA 简称为 LCR TDD（Low Code Rate TDD，即低码片速率 TDD 方案）。

经过一年多的时间，经历了几十次工作组会议几百篇提交文稿的讨论，在 2001 年 3 月棕榈泉的 RAN 全会上，随着包含 TD-SCDMA 标准在内的 3GPP R4 版本规范的正式发布，TD-SCDMA 在 3GPP 中的融合工作达到了第一个目标。

5.2 似曾相识燕归来—　谈谈 TD-SCDMA 与 WCDMA

我们之前说过，TD-SCDMA 由于也是由 3GPP 组织制定的协议，其网络结构等方面采取了和 WCDMA 相似的结构。我们不妨先来了解一下整体框架中相似的部分，然后再去了解 TD-SCDMA 相对于 WCDMA 的差异之所在，这样有利于我们迅速形成对 TD-SCDMA 的基本认识。

首先，我们可以从图 5.3 中看到，TD-SCDMA 的网络结构和 WCDMA 是完全一样的，基站也叫 Node B，基站控制器还是叫 RNC。接口的名字也没有什么变化，Uu 接口、Iub 接口、Iu-CS 接口、Iu-PS 接口一样都不少。更重要的是，这些设备的功能也没有发生变化。

如果我们对 GSM 网络或者 WCDMA 网络熟悉，那么很轻松就可以搞清楚 TD-SCDMA 这些网络设备都是做什么的，其相互之间的关系是什么，它们之间有哪些接口。从这一点上来说，有一点移动通信基础的人学习 TD-SCDMA 比起学习 cdma2000 要方便很多，因为虽然 cdma2000 的网络结构跟其他几种制式也差不多（没办法，谁让这个结构是人类智慧的结晶呢），但是它的名字却大大不同。初学者碰到 cdma2000 里面的诸多名词，什么 CBSC、PCF、A1/A2/A3……A9/A10/A11 接口，一时间往往容易两眼一抹黑，搞不清和自己以前学过的什么 GSM 等标准里面设备和接口的对应关系，从而学起来要麻烦得多。

上面提到的是学习 TD-SCDMA 的第一个好处——有着相同的网络结构。第二个好处更容易看出来，WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000，这 3 者有什么共同的特点？恩，聪明的你一定一眼就看出来了，那就是这 3 者都有一个词叫做“CDMA”。

没错，这 3 者的空中接口尽管千差万别，但是有一个共同的基础，就是它们都采取了 CDMA 技术（当然，TD-SCDMA 还采取了 TDMA 技术和 SDMA 技术，稍后再表）。

我们知道，CDMA 技术其核心就是要找到合适的扩频码。如图 5.4 所示，TD-SCDMA 也采取了和 WCDMA 一样的 OVSF 码（cdma2000 的叫做 Walsh 码，其原理都是一样的）。所以，在 WCDMA 中经常打交道的这棵码树又出来了，在你眼前晃啊晃啊……

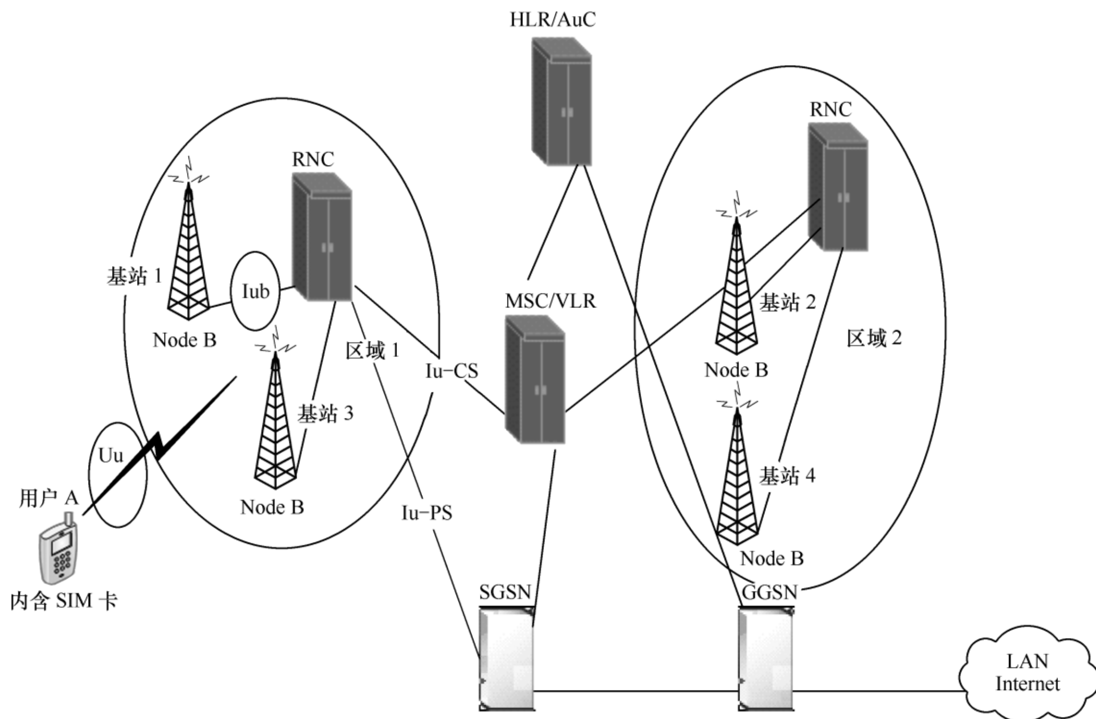


图 5.3 TD-SCDMA 网络结构

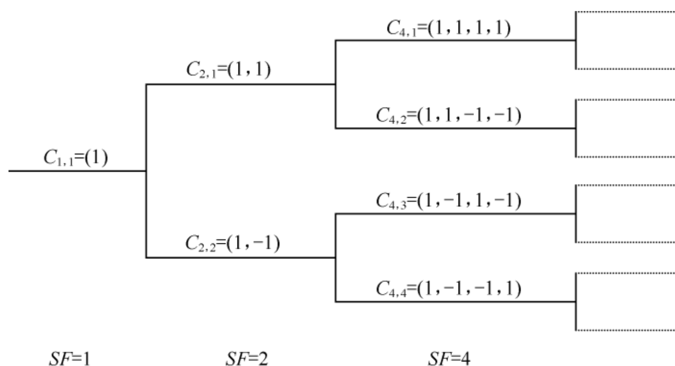


图 5.4 TD-SCDMA 中的扩频码

但值得注意的是，TD-SCDMA 的扩频码虽然和 WCDMA 一样都是采用 OVSF 码，但是其变化范围是不一样的。WCDMA 变化范围很广，下行可以从 4～512，上行可以从



4～256。而 TD-SCDMA 因为在时间轴上对用户还有一个划分，每个用户都是承载在一个时隙内，自然一个时隙就不能承载太多的用户，也就不需要太多的扩频码。

所以，TD-SCDMA 在下行方向，扩频码只有两个，一个是 1，一个是 16，当采用低速率的业务时就使用为 16 的扩频因子，当需要高速率业务时，就采用为 1 的扩频因子，只有两个扩频码，实现起来比较简单，可以降低系统的复杂程度。另外，一个重要的好处就是终端比较容易判断其他用户所采用的扩频码，自己占用了为 1 的扩频因子的话，那本时隙就没有其他用户了；若自己占用了两个 $SF = 16$ 的扩频码，其他用户的扩频无外乎就是另外那 14 个，试两下就能出来。知道其他用户的扩频码有什么好处呢？答案就是方便终端进行多用户检测，也就是通过知道所有用户的扩频码，可以把所有信号都解出来，而不是像以前单用户检测的时候把这些都当噪声处理。多用户检测的内容在 5.4.3 节有描述，大家现在把它理解为一种更先进、更能降低系统干扰的解码方式即可。

上行的扩频因子相对而言要灵活不少，可以在 1、2、4、8、16 之间选择，这样在上行方向可以有更多选择，不至于流量稍微大一点就非得选 $SF = 1$ 的扩频因子不可，也可以避免由于扩频因子变化太大而造成发射功率的峰均比过高。由于基站子系统是知道小区下所有终端的扩频码的，因此多增加一些扩频码的选择对于基站进行多用户检测并不是什么麻烦的事情。

大家知道，做无线通信这行的人，往往最关注的就是空中接口（这个接口在 GSM 和 cdma2000 中叫做 Um 接口，在 WCDMA 和 TD-SCDMA 中叫做 Uu 接口）。在空中接口的设计上，无论哪种标准采用的都是分层结构，通俗一点讲也就是 ISO 那个堆积木结构。你还真别小看 ISO 当年提出的那个 7 层结构，这个结构在计算机和通信领域发挥了巨大的作用，也被这个领域的个人和机构所广泛遵守着。理由很简单，一来做协议不分层从头搞到尾能把你累死；二来就算你弄出来了，你跟大家遵循的标准格格不入，你和谁互通去？所以，TD-SCDMA 在空中接口也采用了和 WCDMA 一样的层级化结构，如图 5.5 所示。为了简单起见，我们在图 5.5 中只列出了一个三层结构，上层由于和无线接入网（RAN 侧）无关，所以也就不详细列举。TD-SCDMA 空中接口的物理层、MAC 层、RLC 层、RRC 层要完成的工作与 WCDMA 一样，其中 RRC 层、RLC 层、MAC 层的工作机理基本一样，而物理层则不然。

我们刚才列举了 TD-SCDMA 和 WCDMA 其网络结构相同、其空中接口的协议栈相同、其 OVSF 码相同，那么有什么地方是不同的呢，或者说 TD-SCDMA 作为 3G 的三大国际通信标准，其与 WCDMA 的主要差异在哪里？

答案就是空中接口的物理层！虽然我们可以从核心网、接入网、业务等层面给出两者之间的很多差别，但其关键的差异还在于空中接口的物理层，实际上，3 大标准的主要差异也在于空中接口的物理层！

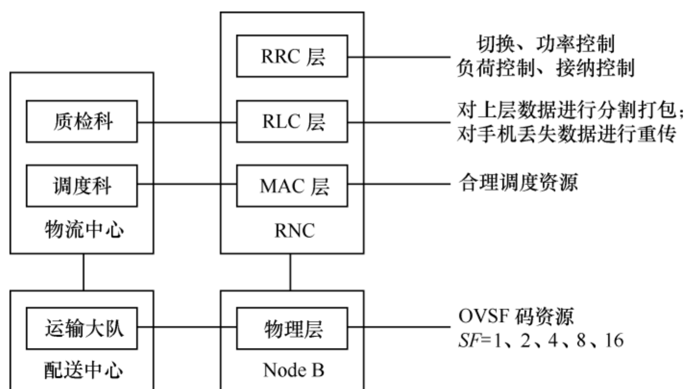


图 5.5　TD-SCDMA 空中接口的结构

我们可以从 3 大 3G 标准的名称来发现其中的玄机，WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000，什么是“WCDMA”、什么是“TD-SCDMA”？这不就是多址复用方式么。多址复用发生在哪里呢？不就在空中接口的物理层么！

实际上，对空中接口的物理层进行变革是移动通信中永恒的话题，从 GSM 到 WCDMA 如是，从 WCDMA 到 LTE 亦如是。因为在移动通信中，由于电磁波四散发射带来的干扰，最宝贵的东西永远是频谱资源，最重要的事情永远是对频谱资源最大限度的利用。所以也无怪乎人们总是在物理层上做文章。

除了物理层上的变化以外，TD-SCDMA 还引进了很多先进的关键技术来提升自身性能，概况起来说有智能天线技术、联合检测技术、接力切换技术、动态分配信道、软件无线电等新特性，我们会在接下来的篇幅中详细介绍这些技术。

5.3 秀秀“TD-SCDMA”

其实 TD-SCDMA 是由两部分组成的，第一部分叫做“TD”，也就是“Time Division”，把时间切成片给不同的用户使用；第二部分叫做“SCDMA”，也就是“Synchronization CDMA”，同步 CDMA 的意思，这个解释起来有点复杂，且容稍后再述。在这里，我们不妨把这几个词拆开分别“秀”一下，因为“TD-SCDMA”这个词，就包含了这种标准最关键的技术，对这个词来字斟句酌有利于我们对它的理解。

5.3.1 秀秀“TD”

要把 TD 这个词解释清楚，又要涉及那个讨厌的空中接口的帧结构。说它讨厌，是因为它比较复杂，但是它有一个好处就是可以呈现最本质的东西给你。我们在第 3 章介



绍了 GSM 的帧结构，在第 4 章介绍了 WCDMA 的帧结构，不妨再把它们拉进来，温故而知新一把，因为 GSM 能告诉我们什么叫“TD”，WCDMA 能告诉我们什么叫“CDMA”，加在一起就成了“TD-CDMA”。当然，还少了一个“S”，我们在下一小节再把这个“S”补上去。

1. GSM、WCDMA 与 TD-SCDMA 的帧结构

GSM 完美阐述了什么叫做“TD”，把时间切成 8 块，每一块叫做一个时隙，不同的时隙分配给不同的用户，就完成了“时分”的过程。GSM 帧结构如图 5.6 所示。

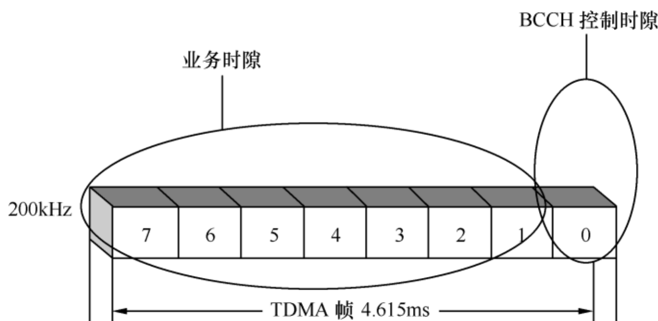


图 5.6　GSM 的帧结构

WCDMA 是 CDMA 技术的典范，从图 5.7 我们看到，虽然 WCDMA 中也划分“时隙”。但是所有时隙都是给同一个用户用的，并不从时间上来对用户进行区别，而是通过不同的“扩频码”来对用户进行区分。WCDMA 一个帧的时间长度和 GSM 是有所不同的，为 10ms，相比 GSM 那个讨厌的 4.615ms 而言这个数字要更好记，也方便各种运算。3 大 3G 标准都采取了同样的帧长或者是这个帧长的倍数，比如 WCDMA 和 TD-SCDMA 用的是 10ms 帧长，而 cdma2000 用的是 20ms 帧长。

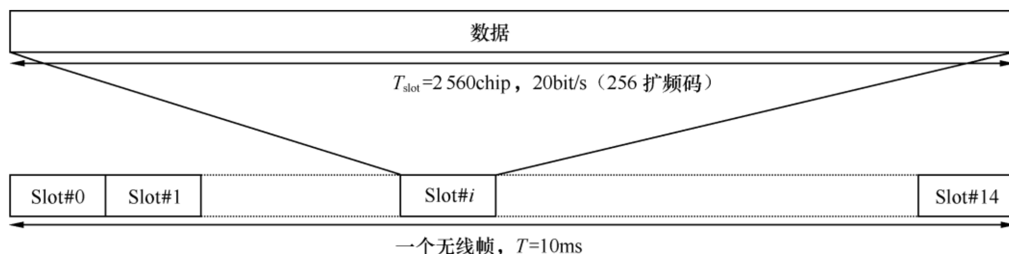


图 5.7　WCDMA 的帧结构

图 5.8 是 TD-SCDMA 空中接口的帧结构，我们可以从图中看到，这个帧结构有点复杂，因为它一个无线帧下面还有两个无线子帧，这是我们之前没有碰到过的情况。由于两个子帧长得一模一样，所以我们只需挑出一个来进行分析就可以了。

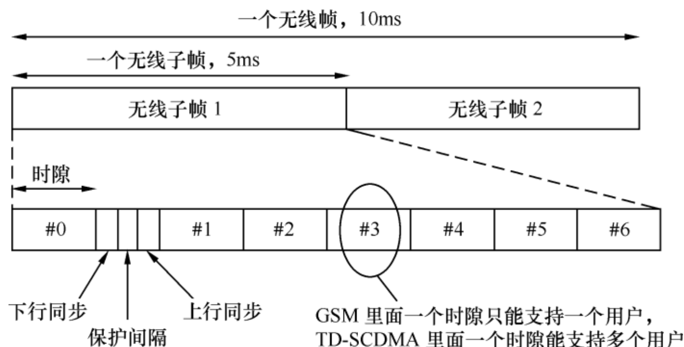


图 5.8　TD-SCDMA 帧结构

乍一看，TD 的这个无线子帧长得还真像 GSM，不同的时隙也是分配给不同的用户，只不过 GSM 是 8 个时隙，这里是 7 个时隙。但是要注意的一点就是，TD-SCDMA 不仅有“TD”，还有“CDMA”，也就是说在 TD-SCDMA 里面，不同的用户信号是可以在同一个时隙里发射的，一个时隙是可以支持多个用户的，只要它们采用不同的扩频码！

另外，我们看到，一个无线子帧中除了 7 个常规时隙以外，还有 3 个特殊时隙，分别叫做“下行同步”、“保护间隔”和“上行同步”。对于下行同步相信大家并不觉得新鲜了，在 GSM 里面，就有一个叫做“SCH”的同步信道来干这个活，只不过在 GSM 里面 SCH 信道跟什么 BCH 信道之流的都挤在 0 号时隙，不像 TD 里面有这么好的待遇，可以自己单独霸占一个时隙来做同步。在 WCDMA 里面，同样不缺乏用来进行下行同步的信道，叫做“P-SCH”信道和“S-SCH”信道。

除此之外，这里还有一个奇怪的信道，它单独霸占了一个特殊时隙，用于“上行同步”。这属于 TD-SCDMA 的独特现象，其他几种标准里都没有，这个时隙用来做什么的呢。我们在这里暂且不表，放到下一小节里。

“保护间隔”很好理解，无非是用来隔开上下行，避免上下行撞到一起用的。

2. TD 基站之间为什么必须时间同步

TD 作为一个时分系统，是非常讲究时间同步的，它要求所有基站之间都必须同步，这是为什么呢？为什么同样作为时分系统的 GSM 没有这么苛刻的要求呢？我们不妨举个例子来说明。

如图 5.9 所示，有两个相邻的基站和 1 个手机，其中手机处于基站 1 的覆盖范围内。由于 TD-SCDMA 系统是一个“**时分双工**”的移动通信系统，这也就意味着上下行不是通过采用不同的频段来区隔，而是通过在不同的时间段来分别发射上行和下行信号这样的方式来区隔。这是 TD-SCDMA 以及后来的 TDD-LTE 与其他频分双工系统的不同



之所在。

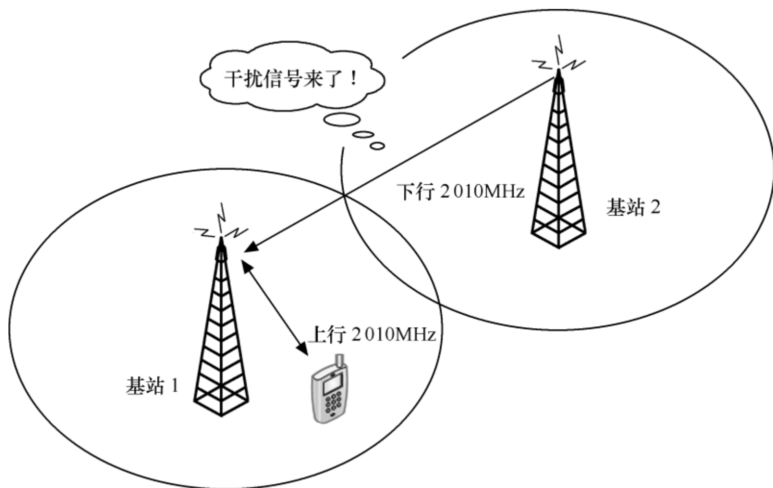


图 5.9　TD 系统——基站 1 和基站 2 不同步，出现干扰

所以基站 1 在某个时刻是在向手机发射信号，还是在接收信号完全取决于时隙，如果该时隙定义为发射下行信号，那么基站就发射信号；如果该时隙定义的是用于上行，那么就只是接收手机发射的信号。

时分双工系统由于基站和手机采用的是相同的频率，那么就存在一个潜在的隐患。如果相邻基站没有精确同步，那它们的收发时隙可能就会有错位。那么假设基站 1 此时正在接收来自手机的上行信号，而此时与其相邻的基站 2 由于和基站 1 并不是同步的，时间不一样，那么基站 2 此时可能正在发射下行信号。由于手机和基站 2 都是用相同的频率发射的信号，那么基站 1 就分辨不清楚收到的信号到底是不是来自于手机，因为它很容易把来自基站 2 的同频信号也当成是来自手机的信号。也就是说如果失步基站在下行信号的发射时隙刚好落在正常基站的接收时隙里，正常基站就无法接收手机发出的上行信号，这样就会造成强干扰。由此可见，在 TD-SCDMA 系统中，失步基站很容易对附近所有基站造成很大的干扰。

为了避免相邻基站的收发时隙交叉，减少干扰，TD-SCDMA 系统要求所有网内基站之间必须同步。

大家可以想想为什么 GSM 也是一个时分系统，也是通过时隙来工作，怎么就不会有这样的情况？我们不妨先看看图 5.10。

在 GSM 里面，即使基站 1 和基站 2 时间不同步，出现了时隙交错，基站 2 也无法对手机的上行进行干扰，因为它们处于不同的频段。上下行处于不同的频段，通过频段来对上下行信号进行区隔叫做**“频分双工”**，比如 GSM、WCDMA、cdma2000；上下行

处于同一个频段，通过不同的时间来进行区隔叫做“**时分双工**”，比如 TD-SCDMA、PHS。GSM 和 TD 虽然都采用时分复用，但是其双工方式不同，也就是说区隔上下行信号的方式不同，从而导致了对基站同步的要求的不同。

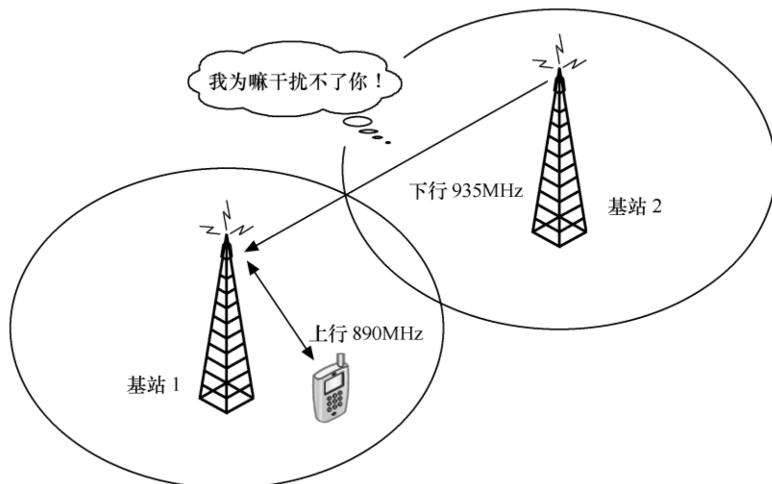


图 5.10　GSM 系统——基站 2 的下行和手机的上行频段不同，无法干扰

我们看到，为了时分双工 TD 是付出了一定代价的，那么时分双工又有什么好处呢？

（1）频谱的灵活性。采用频分双工的话，上下行需要成对的频谱，在 2GHz 以下，已经是比较难了。而时分双工不需要成对的频谱，相对而言分配起频谱来要简单不少。这对 TD-SCDMA 未来的国际化有着重要意义，因为在国外尤其是一些发达国家频谱资源已经很紧张了，能节省频谱资源这个优点对于在这些国家推广 TD-SCDMA 很有好处。

（2）对不对称业务的支持。对于时分双工而言，上下行工作于同一个频段，只是不同的时隙，这样就可以通过调整上下行的时隙数目来适应上下行的业务量。我们知道，对于互联网数据业务而言，上下行的流量一般而言是不对称的，下行流量一般要远大于上行流量。既然如此，那么上下行分配相等的带宽是不是显得有点浪费呢？

（3）上下行链路的相关性。由于时分双工系统上下行工作于同一个频率，所以上下行的传播特性比较相近。基站端的发射机就可以根据在上行链路上得到的接收信号来了解下行链路的多径信道的特性，从而可以非常方便地使用我们后文将说到的智能天线。频分双工系统由于上下行工作于不同的频段，而不同频段的电磁波其传播特性各不相同，因此很难根据上行的情况判断下行的情况，用起智能天线来就没那么方便了。

（4）设备成本较低。由于上下行工作于相同的频段，其发射机和接收机就比较简单，从而可以使得设备成本比频分双工的要低 20%～40%。



3. 用什么来同步— 从 GPS 到北斗

说到时钟同步，目前在现网里广泛应用的一种方式就是通过 GPS 来校准时钟。比如当前 TD-SCDMA 系统和 cdma2000 系统的外部天线上都装有 GPS 接收器，并以此接收同步信号。GPS 的时钟信号非常精准，但是同时也带来了一个问题，就是整个网络的安全完全依赖于美国的 GPS 的工作状况。一个 GPS 系统的示例如图 5.11 所示。

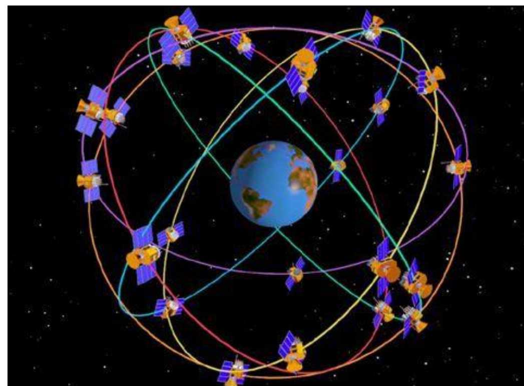


图 5.11　GPS 系统

据报道，2010 年 1 月 13 日，由美国空军控制的全球卫星定位系统 GPS 进行系统升级，严重依赖 GPS 授时服务的中国电信 CDMA 网络出现大范围告警。中国电信表示，“这几天，GPS 正在进行升级维护，CDMA 现网中部分厂家的基站设备在告警机制设置上，每隔 12 分钟有 1 秒钟的丢星现象，现网中出现了大量网络告警”。

GPS 是美国空军主导的定位系统，是向所有用户免费开放的全球卫星导航系统。GPS 发射信号分为军用和民用两种，其中军用信号专供美国军方，民用信号免费开放给全球用户。GPS 系统的开关掌握在美国手中，美国随时可以扩大信号误差、关闭信号，让几百万平方千米的人员、设备突然“消失”，甚至可以关闭特定区域信号，让 GPS 失灵。例如，1993 年 7 月 23 日，美国指控中国“银河号”货轮将制造化学武器的原料运往伊朗，制造“银河号”事件。当天，“银河号”上的 GPS 导航设备突然失灵，失去航行方向。直到美军强行搜查后，船上 GPS 才恢复正常。

近几年，GPS 因其强大的定位导航功能，使民用用户数量呈几何级增长，成为众多国家民众生活的重要组成部分。许多国家的政府、专业部门甚至对 GPS 产生了严重依赖。由于中国电信 CDMA 在网络同步实现等方面依赖 GPS 系统，CDMA 通信基站在工作的切换、漫游等方面都需要 GPS 的精确时间控制，因此，当 GPS 系统升级时，CDMA 网络就会受到影响。2010 年 1 月 13 日出现的网络告警，涉及中国绝大多数省份，但并没有引发网络中断和延时，用户没有多大感知。但是，中国电信的外企设备商称，如果 GPS 在 72 小时内中断授时，电信 CDMA 系统就会全面瘫痪。

CDMA 网络技术要求全网同步，对授时要求非常高。而目前除了 GPS 外，还很难找到替代品。这次告警事件也表明：中国网络安全的关键技术还掌握在别人手里。中国在通信网络技术上如果完全依赖于美国 GPS 系统，是存在很大安全隐患的。

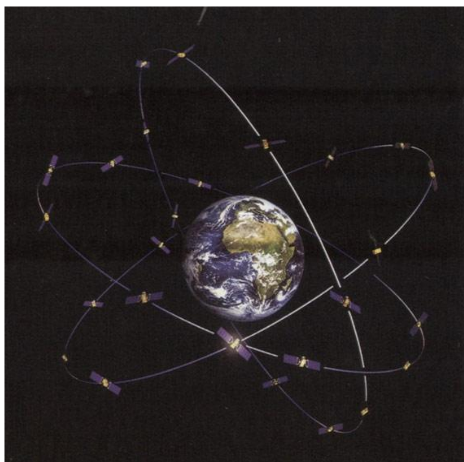


早在中国联通开通 CDMA 时，就曾因为美国 GPS 未授时，出现过瘫痪事件。在很长一段时间内，由于缺乏先进的网络同步技术，中国移动自行发展的 TD-SCDMA 技术也采用 GPS 同步。但由于使用 GPS 存在的安全隐患，国内厂家一直在努力，希望在 TD 的同步问题上能够绕开美国的 GPS。很多新方法不断被提出并得到实践的验证，其中利用我国自主发射的北斗卫星作为时间信号源成了一个重要的替代方案。

北斗卫星导航系统是中国自行研制开发的区域性有源三维卫星定位与通信系统（CNSS），是除美国的全球定位系统（GPS）、俄罗斯的 GLONASS 之后第三个成熟的卫星导航系统。北斗卫星导航系统致力于向全球用户提供高质量的定位、导航和授时服务，其建设与发展则遵循开放性、自主性、兼容性、渐进性这 4 项原则。2011 年 4 月 10 日 4 时 47 分，我国在西昌卫星发射中心用长征三号甲运载火箭，成功将第八颗北斗导航卫星送入太空预定转移轨道。

我国正在建设的北斗卫星导航系统空间段由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成，提供两种服务方式，即开放服务和授权服务（属于第二代系统）。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务，定位精度为 10m，授时精度为 50ns，测速精度 0.2m/s。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。

根据系统建设总体规划，2012 年左右，“北斗”系统将首先具备覆盖亚太地区的定位、导航和授时以及短报文通信服务能力；2020 年左右，建成覆盖全球的北斗卫星导航系统。北斗系统星位图如图 5.12 所示。


图 5.12　北斗系统星位图

从 2008 年 3 月开始，中国移动启动了“TD-SCDMA 系统 GPS 替代方案”等技术工作，探讨采用 1588v2 替代 GPS 时钟传送技术，并建设 PTN 传输网，实现 GPS 之外的授时方案。一方面通过有线传输网络传送精确时间同步信号；另一方面在 TD-SCDMA 基站加装“北斗系统”模块，采用 GPS/北斗系统双模同步方式，并互为主备用，最终从时间信号的来源和传输两个方面相结合，彻底摆脱对 GPS 的依赖。基于北斗卫星的授时方案已在研究实验中完成测试，并显示具有和 GPS 系统相同等级的授时精度，可满足 TD-SCDMA 同步要求。自 TD-SCDMA 二期设备以来，各主要 TD-SCDMA 设备厂商都普遍推出了支持 GPS/北斗系统双模同步方式的设备，从而成功地绕开了美国 GPS 系统，为中国的自主创新系统添光加彩。



5.3.2　秀秀“SCDMA”

提起 TD-SCDMA，除了大唐之外，还有一家公司绕不过去，那就是北京信威。信威公司最初由 4 个从美国留学归来的人所创办，并提出了 SCDMA 无线通信标准，这也是后来成为国际标准的 TD-SCDMA 的重要组成部分。

SCDMA 看起来只比 CDMA 多一个字母，但这一个字母却意义非凡，它是中国第一个完全自主知识产权的无线通信核心技术！

其实这个标准在国内也有不少应用，比如曾经也有不小名声的“大灵通”。2003 年，中国网通曾计划在全国范围内大规模上马 SCDMA，谈判和准备工作一度进入了相当层次，但由于担心 3G 发牌和电信重组等因素，最终上马的也只有 5 个省份。随着 PHS 在城市的开花，CDMA450 在偏远农村的应用，SCDMA 逐渐式微。但 SCDMA 作为中国第一个无线通信标准，在中国通信的历史上留下了浓墨重彩的一笔，也为其后的 TD-SCDMA 的发轫奠定了重要的理论基础。

1. 为何需要上行同步

在 TD-SCDMA 中，这个 S 指的是同步（Synchronization）的意思，我们在上一小节里说过了基站之间的同步，在这里要谈谈手机之间的上行同步（Uplink Synchronization），这也是 TD 的特色之一。

所谓上行同步，指的是同一时隙内的不同用户的信号同步到达基站接收机，如图 5.13 所示。对于 TD-SCDMA 系统来说，终端支持上行同步是必需的。

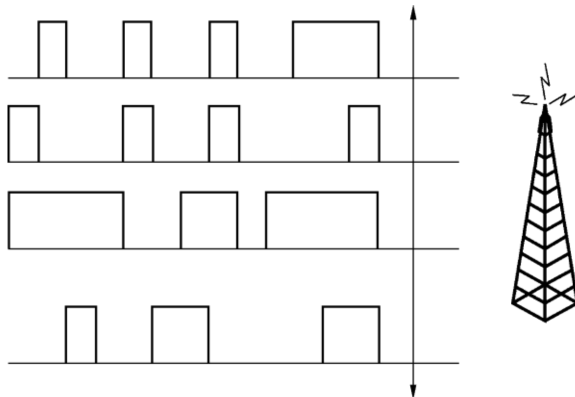


图 5.13　上行同步

我们知道，TD-SCDMA 是一个码分系统，但是 WCDMA、cdma2000 同样也是码分系统，为什么那两个标准没有做上行同步，而 TD-SCDMA 进行了上行同步，这样做有

什么好处？

我们知道，对于 TD-SCDMA 系统而言，同一个时隙里有多个用户同时接入，如图 5.14 所示。

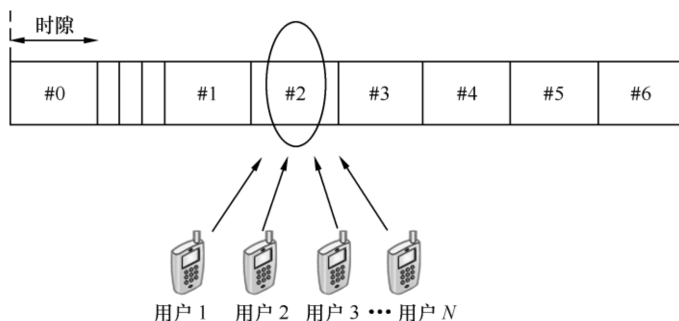


图 5.14　多用户接入同一个时隙

我们知道，基站之所以能够区分出同一个时隙内的不同用户，那是因为图 5.14 中的用户 1 到用户 N 采用的不同扩频码。在这里，我们假设用户 1 采用的扩频码是 $C_{8,2}$ =（1,1,1,1,−1,−1,−1,−1），用户 2 采用的扩频码是 $C_{8,4}$ =（1,1,−1,−1,−1,−1,1,1），如图 5.15 所示。假如两个用户的信号同时到达基站，那么对于用户 2 的信号，基站可以用用户 1 的扩频码对其进行解扩滤除之，具体计算结果如下：

$$C_{8,2} \times C_{8,4} = [1\times 1+1\times 1+1\times(-1)+1\times(-1)+(-1)\times(-1)+(-1)\times(-1)+(-1)\times 1+(-1)\times 1] = 0$$

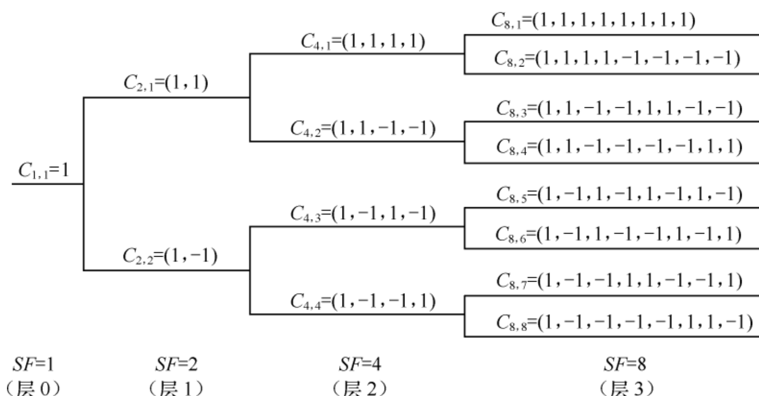


图 5.15　OVSF 码树

如果这些用户的信号都可以同步到达，那么由于扩频码的正交性，一个简单的解扩动作就可以实现对其他用户信号的完美滤除，从而实现区分不同用户的目的。

现在问题就来了，如果到达的时间不一致呢，比如说用户 2 的信号慢了一拍到达基站，会发生什么样的情况？用户 2 扩频后的信号就不再是（1,1,−1,−1,−1,−1,1,1），而是



（1,1,1,−1,−1,−1,−1,1）了。我们不妨再来计算一次：

$C_{8,2}\times C_{8,4}(\text{延时}) = [1\times1+1\times1+1\times1+1\times(-1)+(-1)\times(-1)+(-1)\times(-1)+(-1)\times(-1)+(-1)\times1] = 4$

也就是说，因为用户 2 的信号到达晚了，导致扩频码之间不正交了，从而没法完全滤除掉。用户 2 的信号就此成了用户 1 的底噪，并使得用户 1 的信噪比降低，进而影响用户 1 的通信质量。

我们为什么说 WCDMA、cdma2000 系统的上行都是干扰受限，那是因为各个用户上行信号不同步，从而影响了扩频码之间的正交性，抬升了底噪，进而最终影响了系统的容量。

2. 如何进行上行同步

当手机上电之后，它必须首先建立下行同步。如果连基站的位置在哪里、有些什么样的系统信息都不知道，想建立和基站的上行同步是不可能的。当建立了下行同步之后，虽然手机可以收到基站的信息，但是它与基站间的距离却是未知的。如果距离未知的话，那么信号到达基站的时间也无法控制，这将导致各个手机到达基站的时间不一致。到达时间不一致的后果我们在上文中也提到了，就是会提升整个系统的干扰。

现在终于可以对我们在图 5.8 中埋下的伏笔进行一下答疑了，在 TD-SCDMA 中，3 个特殊时隙中有一个专门用来进行“上行同步”。我们可以对照图 5.8 给出的时隙图，先来理一理 TD-SCDMA 中手机接入网络的过程，最初手机都必须监听 0 号时隙的系统信息，得知网络的种种信息（这与 GSM 网络并无二致）；然后手机和基站要进行一个下行信息的同步，这就是“下行同步时隙”的工作。手机在间隔一段时间之后（参见间隔时隙），会在“上行同步”这个特殊的时隙上发射一串特殊的固定内容的码字，也叫做上行同步序列。基站收到这串序列之后，就会进行比对，根据码延迟的位置和功率减少的多少来决定手机接下来的发射功率和时间调整值，并通知手机。手机得知了应该在什么时间发射之后，就会进行时间调整，然后发起接入网络的随机接入消息。基站与手机之间的接入过程如图 5.16 所示，上行同步过程如图 5.17 所示。大家可以看到，上行同步是从监听系统消息到最终发起随机接入之间的一个小步骤，但是这个步骤却非常重要，这个过程可以在很大程度上降低上行的干扰，从而大大提高系统容量。想想，这个同步过程中居然就是 SCDMA 中的“S”，即“Synchronization”，标准都以这个名字命名，那么这个过程的重要性就不言而喻了。

在图 5.17 中我们看到，手机发射的信息在空中传播有两个码的时延，因此基站经过和固定的码比对之后，判断手机需要提前的时间量，并根据接收能量判断手机需要的发射功率，从而通知手机接入。

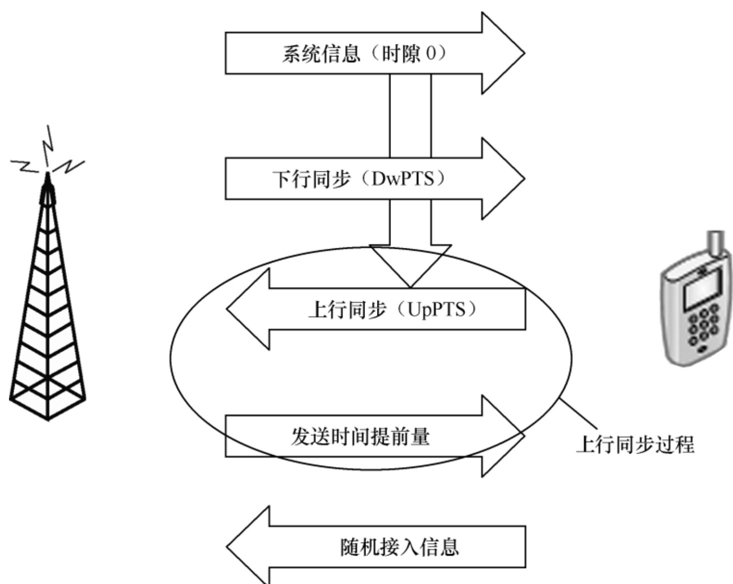


图 5.16　TD-SCDMA 中随机接入过程

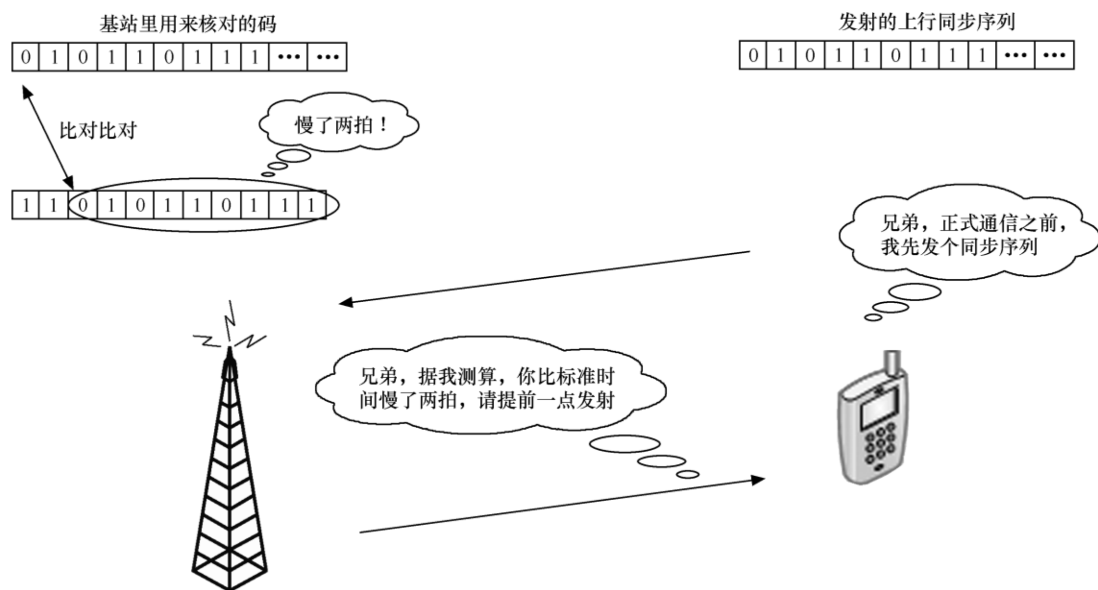


图 5.17　上行同步过程

应当注意的是，上行同步的过程不是一开始同步了就一劳永逸了，为什么这样说呢？因为手机是移动的，它到基站的距离是在不断变化的。因此在手机发射话音和数据的同时，还会掺杂一段“训练序列”，这个序列跟“上行同步序列”的功能是一样的，都是一



段标准的码字，基站根据这段码字进行对比，来判断手机此时此刻的位置，从而不断修正“时间提前量”，从而保证手机与基站始终能够时钟同步。

5.4 秀秀 TD-SCDMA 的关键绝活

我们知道，WCDMA、cdma2000 都是参与者众，研究时间长，论证相对比较成熟的标准。作为后来者的 TD-SCDMA，如果仅仅有时分双工、时分复用、上行同步等几个差异化的特点，就想杀入国际标准体系，跟盘桓在这里已久的两大标准抗衡，显然是不实际的。所以 TD-SCDMA 实现成功突围，必然还有一系列让这个标准脱颖而出的关键绝活，比如智能天线技术、接力切换、联合检测技术、动态分配信道技术等。我们下面就不妨一一来介绍这些技术，看看它们都有什么样的特点。

5.4.1 一如那舞台上的聚光灯— 智能天线

对于舞台上应用很多的聚光灯（如图 5.18 所示），相信大家都不会陌生了。这种灯有两个特点，第一个特点是聚光灯不像普通电灯一样光线像四面八方散射，它把光线聚集起来，投向演员表演的那个区域，而周围基本上没有什么亮光；第二个特点就是它会跟随演员在舞台上的活动，演员走到哪里，它的灯光就跟到哪里，真可谓“月亮走，我也走”。



图 5.18 舞台上的聚光灯

如果把我们在无线通信中通常用到的天线比作是普通电灯的话，那么智能天线就好比聚光灯。普通天线的电磁波是向四面八方传播的，而智能天线却可以将电磁波聚焦于某些方位；普通天线的电磁传播并不随用户方位的移动而有所改变，而智能天线却可以随着用户的变化来改变自己的传播方式。

在 TD-SCDMA 中，智能天线无疑是最受关注的关键技术之一。甚至有人这么理解，TD-SCDMA 中的“S”应该指的是同步 CDMA（Synchronization CDMA）、智能天线（Smart Antennas）和软件无线电（Software Radio）。智能天线之前主要应用于雷达、声纳等军事用途，从 20 世纪 90 年代才逐渐转入民用通信领域。美国 Arraycom 公司在 PHS 系统中实现了智能天线。1997 年，北京信威通信技术公司成功开发出采用智能天线技术的 SCDMA 无线通信系统。1998 年我国向国际电信联盟提交的 TD-SCDMA RTT 建议是第

一个以智能天线为核心技术的码分多址通信系统。除此之外，WiMAX 也将智能天线定义为一项可选技术。大家看这些名字就知道，PHS、TD-SCDMA、WiMAX，通通是时分双工的系统，而 WCDMA、cdma2000，这些频分双工的系统都没有采用智能天线，这是为什么呢？答案在本小节的末尾揭晓。

智能天线的所谓“智能”，主要是从两个方面来体现，第一是说它可以“跟踪”用户终端的具体位置；第二是说它可以根据用户的位置，定向地向用户发射电磁波。

智能天线的运作跟雷达也颇有点相似，雷达向天空中发射电磁波，电磁波被战机反射以后，雷达就可以根据反射的电磁波的情况判断战机的位置，并不断对其进行跟踪，如图 5.19 所示。应当说智能天线实现对手机位置的跟踪锁定来得比雷达还要容易得多，因为手机是主动向基站发射电磁波的，智能天线只需要接收这些电磁波并对手机的位置进行持续跟踪就可以了。

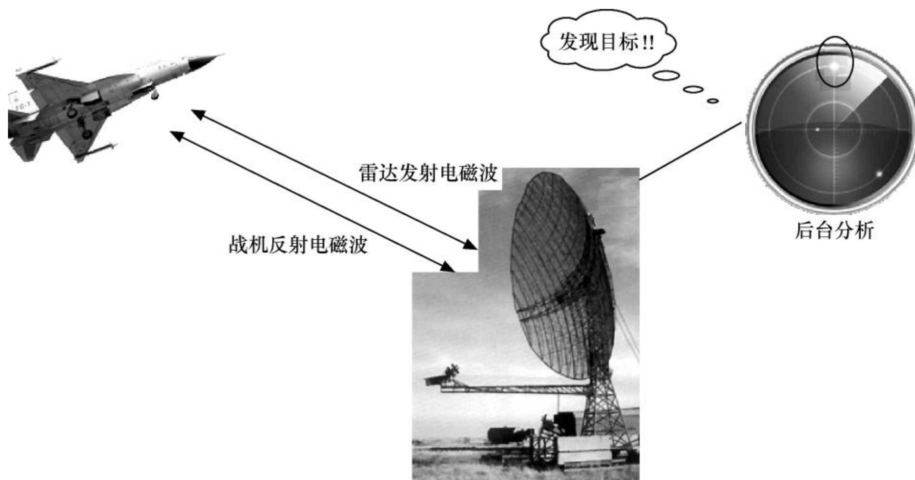


图 5.19　雷达如何“跟踪目标”

话说智能天线有跟踪用户方位和定向发射信号两大特点，这两大特点其背后的技术机理又是怎样的？这样做又有什么好处呢？

首先我们来看看智能天线的构造，从中找出点端倪。图 5.20 是一个单极化 8 阵元智能天线和普通天线的对比。

我们看到，TD-SCDMA 的智能天线比 GSM 或者 WCDMA 里面应用的普通天线要宽很多，之所以要宽很多是因为它是由多根小天线共同组成的天线阵列，这些小天线排在一起，外面罩个壳，就成了智能天线现在这副模样。TD-SCDMA 智能天线宽大的体型给它的建站造成了不少麻烦，很多居民有这么一种潜意识：基站天线越大，其辐射就越强。加上这些小天线又引出许多馈线，密密麻麻的，和 TD-SCDMA 的“大门板”般的



天线堆在一起，很容易引起人们的注意，所以在施工建设过程中所受的阻力不小。其实 TD-SCDMA 的天线只是内部阵元的根数有所增加，与电磁波辐射的强弱并无直接关系。由于 TD-SCDMA 智能天线能够定向地跟踪手机，只需要向某个区域发射电磁波，其基站的辐射相对 GSM 基站而言其实要更低。

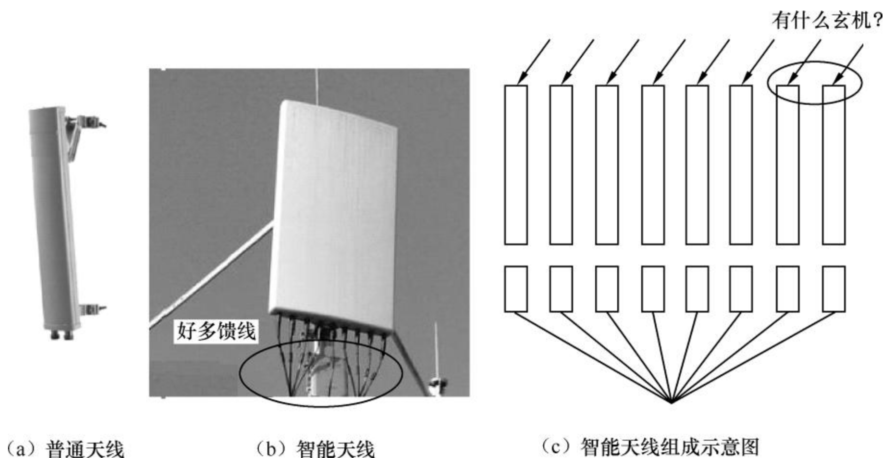


图 5.20　智能天线与普通天线

那么，现在问题就来了，TD-SCDMA 中的智能天线为什么要由多根小天线组成呢？这样做与对用户方位的跟踪是不是有什么关联呢？我们来看图 5.21。

图 5.21 就是对图 5.20 顶端的“有什么玄机”的文字的说明，我们知道，只要手机的电磁波不是面对智能天线垂直入射，那么电磁波到小天线 2 和小天线 8 的距离就会不一样，图中到小天线 2 的距离多了 d。又由于小天线 2 和小天线 8 的距离ΔL 也是固定的（天线制作的时候就确定了）。那么要知道手机所在的方位角θ就变得非常简单，不过就是初等数学中的一个一元一次方程而已，即

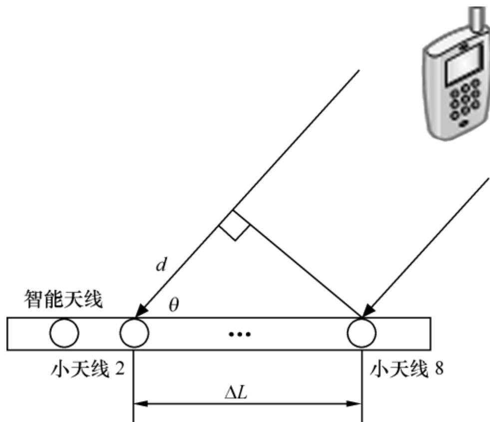


图 5.21　如何判别手机的方位

$$\theta = \arccos(d/L)$$

我想肯定有朋友要问，ΔL 是固定的，θ是算出来了，那个路程差 d 我又怎么得知呢，请大家翻看图 5.17，路程差是可以根据延迟的码片时间乘以光速计算出来的。

上面所说的是如何对手机的方位进行“跟踪”，跟踪的目的是将下行信号定向地发射给手机，那么我们又如何做到“定向”发射呢？

这源于波的干涉特性，波的干涉是智能天线得以实现的最根本的原理。物理学知识告诉我们，频率相同的两列波叠加，会使某些区域的振动增强，某些区域的振动减弱，而且振动加强的区域和振动减弱的区域相互隔开，这种现象叫做波的干涉。波的干涉是波的基本属性，电磁波也不例外。智能天线中的阵元（从小天线 1 到小天线 8）所发出的电磁波信号经过一定的调节，发生了干涉现象，所以会增强在特定方向上的传播，同时其他无关方向上的电磁波则会相应地被削弱，故而也就可以产生定向的电磁波了。

到这里为止，我们就阐述完了基站是如何“跟踪”手机用户方位以及如何“定向”给手机用户发射信号的。但是，我们依然没有回答一个问题，那就是这样做有什么好处？

（1）提高基站的接收灵敏度，基站所接收的信号应该为各天线单元之和。从理论上而言，图 5.22 所示的智能天线所接收到的信号的幅度就应该约为单天线所接收到信号幅度的 8 倍，基站把这 8 根小天线的信号汇拢，上行方向接收的信号的总强度就能提高，从而就能有效提高基站的接收灵敏度。这也不奇怪，增加天线就好比增加耳朵，多增加几个耳朵听觉的灵敏度自然会更高。

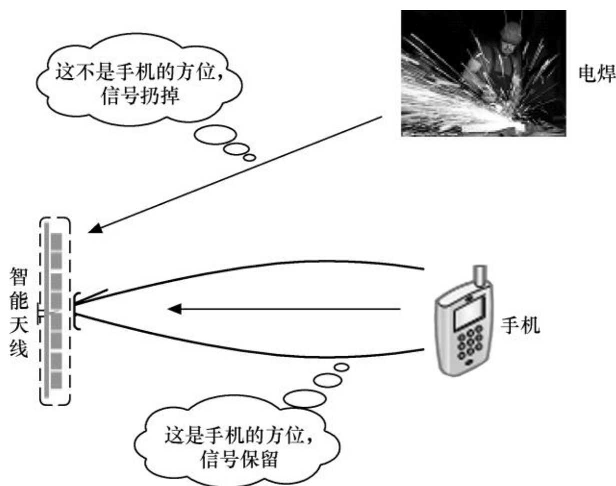


图 5.22　对上行方向的干扰过滤

（2）应用智能天线可以有效降低干扰，无论是上行方向还是下行方向。在上行方向，基站可以判断手机的位置，从而使得接收信号可以有方向性，从而对其他方向发过来的干扰信号有很强的抑制作用。

在下行方向上，由于发送的信号具有一定的方向性，可以将主瓣指向期望用户方向，旁瓣指望其他用户，因此能大大减小对小区内/小区间其他用户的干扰。我们很容易从



图 5.23 中看出智能天线在下行方向进行了有针对性的信号发射，对于目标用户信号很强，对于非目标用户信号很弱，以至于可以忽略不计。

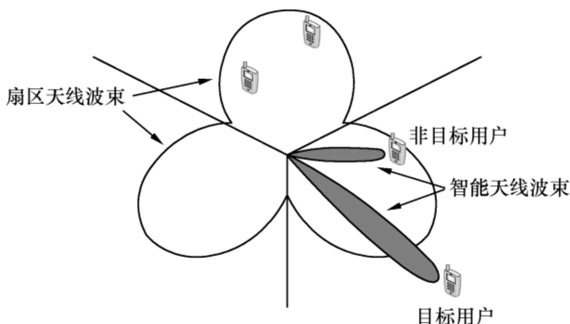


图 5.23　在下行方向降低干扰

我们知道，CDMA 系统是一个自干扰系统，其容量的限制主要来自本系统的干扰。降低干扰对 CDMA 系统来说是非常重要的。由于在 CDMA 系统中的通话质量与小区容量成反比，因此为了提高小区容量，必须牺牲掉一定的通话质量。而如果系统的自干扰能够被有效降低，那么通话的质量自然会有所提高，这时再在保证通话正常进行的前提下牺牲掉一部分通话质量，就能获得更大的系统容量了。因此在 CDMA 系统中使用智能天线，降低了干扰，就势必会使链路性能得到改善，并增加了将全部扩频码所提供的资源都利用起来的可能性，从而实现了提高系统容量的目的。

在这里，我们要回到开篇的那个问题了，智能天线可以提高基站接收灵敏度，降低上下行的干扰，提高系统容量，这么多好处，为什么 3 大 3G 标准只有 TD-SCDMA 采用了这种技术，而 WCDMA 和 cdma2000 系统对此就无动于衷呢？那是因为 TD-SCDMA 采用的是时分双工模式，基站和手机采用相同频率的信号，所以基站在接收手机上行信号时判断出来了手机信号的方向，由于上下行频率相同，传播路径基本对称，因此根据这个方向在下行方向发射信号就可以达到定向发送给手机的目的。这是 TD-SCDMA 与生俱来的优势，作为频分双工的 WCDMA 和 cdma2000 系统无法进行复制。

5.4.2　先同步，后切换一　接力切换技术

TD-SCDMA 技术也是 CDMA 技术的一种分支，传统的 CDMA 技术一般采用的都是软切换技术，比如 CDMA 1X、WCDMA、cdma2000。所谓软切换技术，就是同时和 N 个基站相连，从而实现“无缝切换”的技术。但是到了 TD-SCDMA 这里，这种方式不灵了，必须得另辟蹊径，为什么呢？请看图 5.24。

由于 TD-SCDMA 中需要通过上行同步技术来降低干扰，所以就无法和多个基站同

时保持连接了。比如说图 5.24 中，假设手机同时和基站 1 及基站 2 保持连接，由于手机到基站 1 和基站 2 的距离并不相等，那请问它又该跟哪个基站保持上行同步呢？

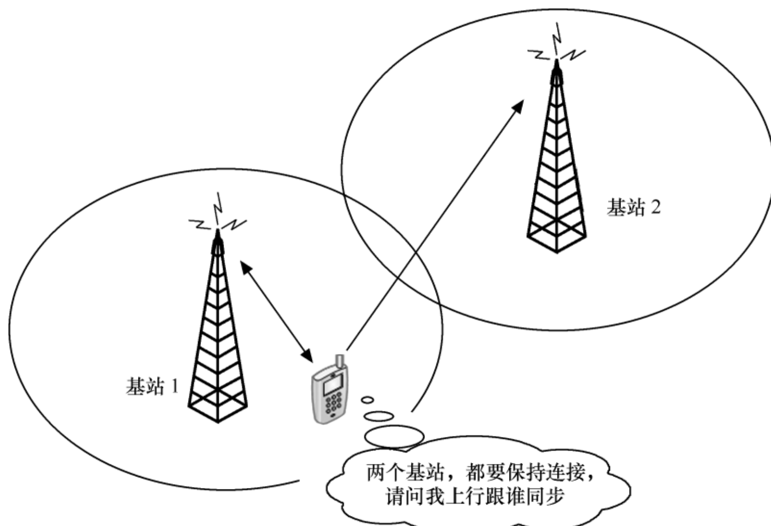


图 5.24　上行同步的困惑

除了软切换以外，倒是还有一种方式可选，那就是 GSM 所采取的硬切换。硬切换指的是从一个基站的覆盖区域向另一个基站的覆盖区域移动时，用户需要先中断和原来基站的连接，然后迅速和新的基站建立连接，是一种“先断后连”的方式。这种先断后连的方式意味着不可靠性，有可能出现掉话，实际上，在某些运营商的掉话统计里，因为硬切换造成的掉话占了 50%左右。

TD-SCDMA 最终没有选择硬切换，而是采用了一种创新的切换方式，叫做“接力切换”。接力切换的基本思想是利用智能天线和上行同步等技术，在对手机的距离和方位进行定位的基础上，根据手机的方位和距离信息的变化来判断目前手机是否移动到了可进行切换的相邻基站的邻近区域。如果手机进入切换区域，RNC 则通知下一个基站做好切换的准备，从而达到快速、可靠切换的目的。

这个切换的过程是比较有意思的，上下行是分别进行切换的。切换时手机的上行信道与目标小区进行上行预同步，而下行信道先不切换过来；等上行信道先完成同步之后，下行信道再切过来。这有点像很多电影里的经典桥段，如图 5.25 所示，一段小水沟，男的先跳过去了，女的跳不过去，于是男同志把手伸出来，女同志把手伸过去，握好以后，就完成了“上行链路同步”，然后开始起跳，落下之前，左手也握好了，这个就完成了“下行链路切换”。恩，看起来还是“有一路先同步”（接力切换）比较安全，想象一下，直接跳过去（硬切换）是不是掉水沟里的风险比较大。



与硬切换相比，接力切换将大大减少因失步造成的丢包，极大地提升了信道质量和切换成功率，降低了掉话的可能性。接力切换之所以优于硬切换，一方面是由于在接力切换之前，系统已经获得了移动台比较精确的位置信息。通过使用上行预同步的技术，手机将在合适的时间将上行专用信道切换到目标小区，排除了硬切换在专用信道切换过后同步不成功的可能。另一方面，接力切换采用上、下行专用信道分步切换的策略。如果上行信道切换不成功，手机还可以将上行专用信道切换回原小区，保证用户不掉话。因此相比硬切换而言，接力切换掉话会更少。



图 5.25　接力切换之跳跃水沟

接力切换是一种应用于同步码分多址（SCDMA）移动通信系统中的切换方法，其前提是上行同步。因为上行同步，所以不能采用软切换；因为上行同步，又可以采用比硬切换成功率更高的接力切换方式。

接力切换也是 TD-SCDMA 移动通信系统的核心技术之一。

5.4.3　事不关己，不准挂起一　联合检测技术

我们之前一直说的都是，在 CDMA 系统中，不同的用户之间是不会产生干扰的，因为它们采用的扩频码不同。实际上，由于多径效应，终端发出的信号无法精确地同步到达接收机，另外由于远近效应也会使接收机收到的各信号强度不同，这两种情况都有可能造成码字之间的正交性被削弱。当不同扩频码之间不再能够保证正交时，不同的用户之间实际上会产生干扰，这就是多址干扰（MAI，Multi-Address Interference）存在的根源之所在。

传统的 CDMA 信号检测方法总是把来自其他用户的干扰（即多址干扰）看作是一种噪声来处理。也就是不管三七二十一，基站和终端对每个信号进行分离和解析的过程都是独立的，至于掺杂在其中的其他用户的信号，我通通当作事不关己的噪声来处理。这



种信号分离技术称为单用户检测（SUD，Single-User Detection）。

这种处理方式从效率上而言其缺陷是明显的，这就好比传达室来了一堆信件，但是没有一个值班人员来分拣，于是你在信件堆里查啊查啊，查到你的你就捞了出来，其余一堆别人的信件你就不管了。然后下一位同学也如法炮制，只查自己的信件，别的一概不管……请问这种分拣方式其效率是不是低下呢？你一定在想，如果有一个值班人员来分拣或者前面的同学在处理自己信件的同时也顺便帮忙给大家分拣那有多好啊。

对于 CDMA 系统而言，当系统中用户数比较少的时候，个别用户产生的多址干扰并不大，这种纯粹把其他用户的信号当噪声的处理方式也未尝不可。但是随着用户数的进一步增加或者信号功率的增大，再把 MAI 当作热噪声一样的干扰，那就会导致信噪比严重恶化，从而使得系统容量大幅下降。比如 IS-95 CDMA 系统正是因为使用了单用户检测技术，所以导致其实际容量远小于扩频码所能容纳的码道数。

实际上，这些多址干扰信号里面包含许多先验的信息，比如这些用户所采用的信道码以及这些用户的信道估计等。这么多有用的信息，全部当作噪声来处理岂不可惜了？所以为了进一步提高 CDMA 系统容量，人们想到将其他用户的信息联合加以利用，也即多用户检测（Multi-User Detection）。多用户检测最早是在 1979 年由 Schneider 首先提出的，后经不断发展，已经成为主流的应对干扰信号分离手段。多用户检测分为干扰抵消（IC，Interference Cancellation）和联合检测（JD，Joint Detection）两种。

干扰抵消技术的基本思想是判决反馈，首先从总的接收信号中判决出其中部分的数据，再根据数据和用户扩频码重构出数据对应的信号，再从总接收信号中减去重构信号，如此循环迭代。

这有点像一种方块拼图游戏，开始来的是一堆看起来有点杂乱无章的块。然后对这些块进行仔细甄别，还原其中一部分（如图 5.26 中圆圈部分所示），那么这一部分就可以从那一堆块中拿出来了，如此循环往复就可以把整个信号进行还原了。



图 5.26　方块拼图



联合检测技术其机理有所不同。它首先将小区的所有用户及其多址干扰作为一个整体接收下来解调。这样干扰就小了，信噪比大大提高，接收灵敏度也就大大提高了。解调后，模拟数字转换成了数字信号，再利用和多址干扰相关的先验信息，结合上行信道信道估计的结果，对整体信号进行联合求解。等于说是一次性把方块拼图拼出来，而不是通过循环迭代的方式一块一块地来拼接信号。我们从图 5.27 中可以很清楚地看出，联合检测方式相对单用户检测方式效果要好很多。

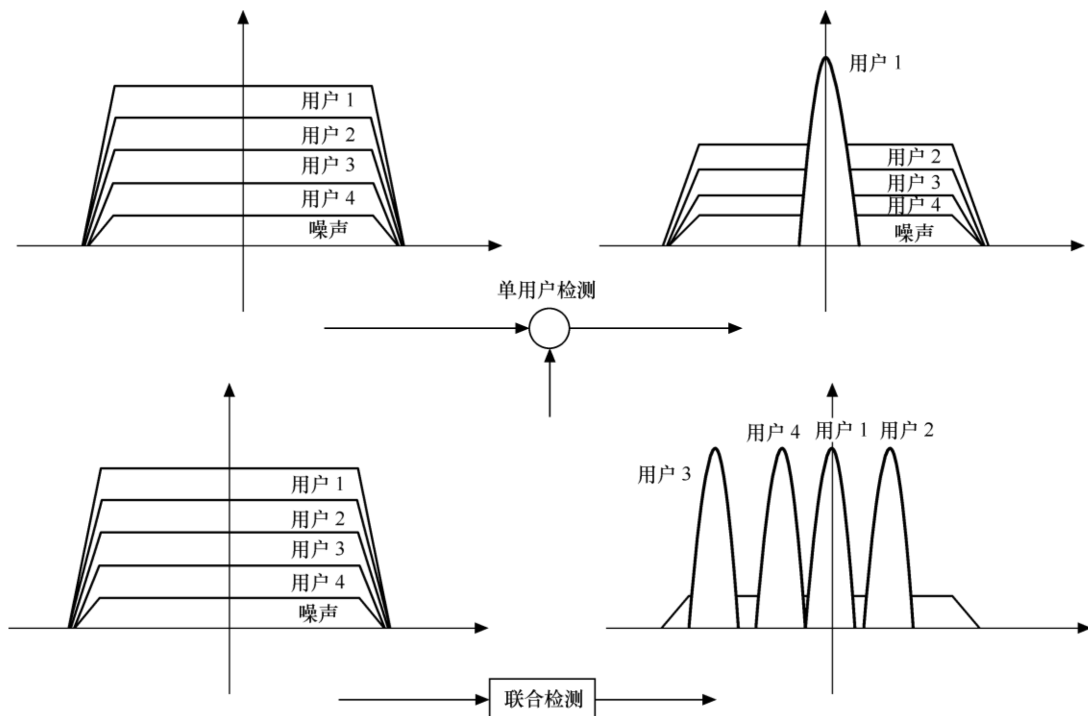


图 5.27　联合检测与单用户检测对比

由于 TD-SCDMA 中每载波的大量用户被分布到每个帧的每个时隙中，因此每个时隙中并行的用户数很少。用户一少，就可以以较低的计算量和较低的信号要求来检测到有用信息，从而降低了设备实现的难度，这也是 TD-SCDMA 进行联合检测相对其他两大标准的优势。其他两大标准由于不进行时分，所以并行的信号是很多的，对于联合检测而言不是太有利。

5.4.4　我是出色的交通指挥员—　动态分配信道

假设在爪哇国的某城市有这么一条道路，分为 7 个车道，其中一个车道专门用于走公交车，另外有 6 个车道可以由你自行调配，道路上的车辆都听作为交警的你指挥，你打算怎样利用道路资源，从而使这条道路达到最好的利用效率？情况如图 5.28 所示。

在一开始搞不清车流量的时候，把 6 条车道对半开算是比较保守和稳妥的做法了，3 条用于由南向北（上行），3 条用于由北向南（下行）。过了一阵发现这种做法很多时候非常浪费道路资源，因为发现由北向南（下行）的车流量往往远多于由南向北（上行）的。因此作为一名聪明的交通指挥员，你可以将用于两个方向的车道调整一下，这样车流量可以均衡得多，如图 5.29 所示。

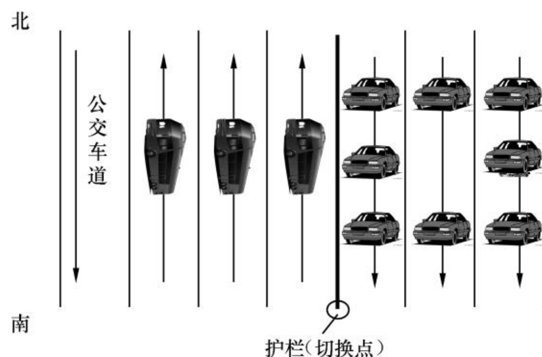


图 5.28 道路分配

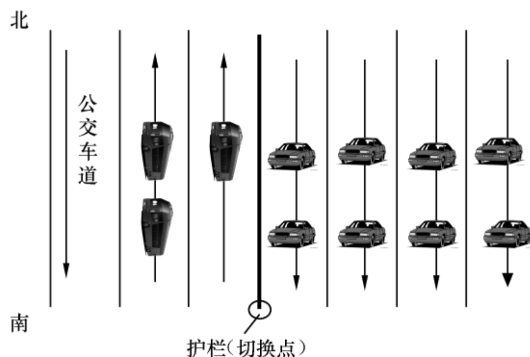


图 5.29 根据负荷动态分配信道

图 5.28 和图 5.29 就是 TD-SCDMA 中经典的慢速 DCA（Dynamic Channel Allocation，动态分配信道）技术。TD-SCDMA 一共有 7 个业务信道，除了 TS0（0 号时隙）为下行公共信道以外，其余 6 个信道可以自由分配。RNC 在进行资源分配时应当能够针对具体的情况来灵活调整小区上下行时隙的划分。由于下行流量往往大于上行，现网通常有 3:3 配比、2:4 配比、1:5 配比等几种 DCA 方式，如图 5.30 所示。

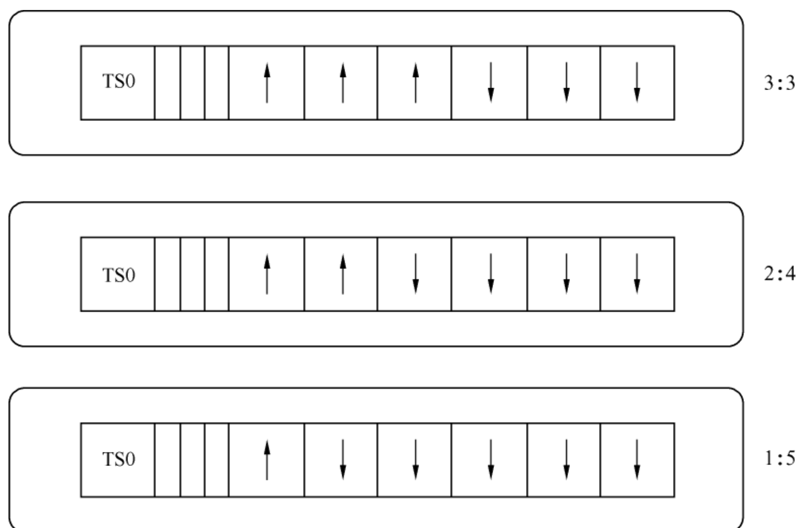


图 5.30 根据需求调整上下行时隙配比



在 TD-SCDMA 中，不光有慢速 DCA，还有快速 DCA，快速 DCA 又是用来做什么的呢？我们重新回到上面那个交通指挥员的例子，来对快速分配信道的方法做个说明。

话说这交通指挥员也不是那么好当的，不仅要根据双向车流量的情况对车道进行合理的分配，还要根据路况以及车型大小来进行合理的调度。比如一条道路质量比较差（某个时隙受干扰严重），就需要把车辆挪到另一条道上去；或是某条道上来了一个装运集装箱的超级载重大卡（比如下行方向某个时隙想采用 $SF = 1$ 的扩频码，传送更多数据），那么也需要把该条道上的车挪下位置，如图 5.31 所示。

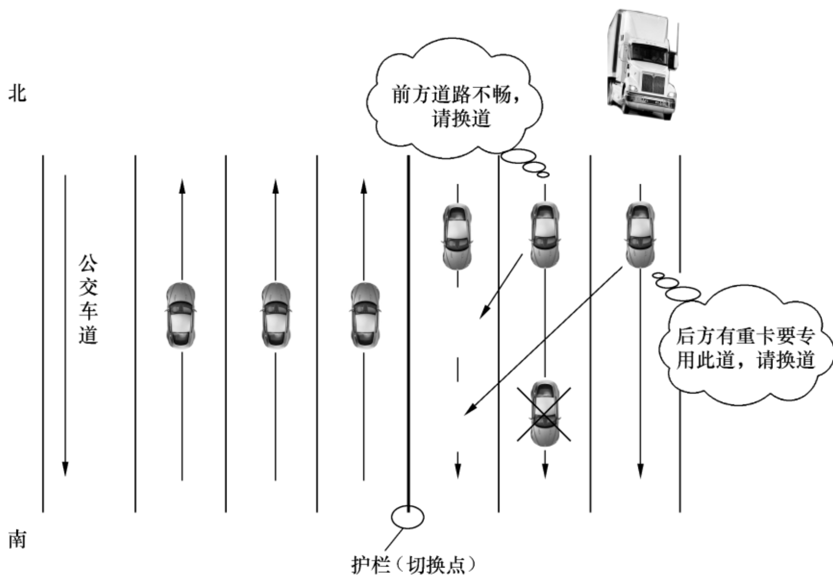


图 5.31　根据情况对车辆进行调度

在 TD-SCDMA 中，以上两种情况可谓是屡见不鲜。第一种是通话中的用户遇到干扰时，通过调整信道来减少干扰，改善通话质量，这种情况比较好理解；第二种情况属于对资源的优化，它有点像计算机操作系统的磁盘碎片整理一样，通过信道的整合，把空闲的资源尽量集中在一个时隙里。一般当实时高速率业务申请到来，而现有资源又不能满足需求的时候，就要对资源进行整合。

如图 5.32 所示，资源整合的过程实质上就是把资源尽量整合在一起的一个过程，从而可以提高带宽业务的接入成功率、切换成功率，提高系统容量和资源利用率。

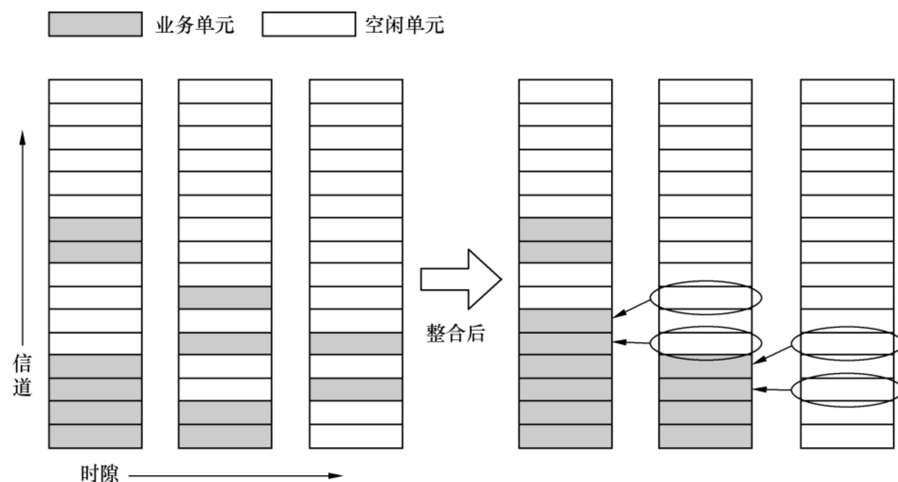


图 5.32 资源整合

5.4.5 看我七十二变— 软件无线电

到现在为止，我们已经学习过 3 种移动通信的制式了，GSM、WCDMA、TD-SCDMA，接下来还有 cdma2000、LTE 和 LTE-Advanced 即将登场。应当说，技术的不断革新对运营商而言是一把双刃剑，一方面运营商可以通过技术的革新来不断让网络的性能提升，满足用户日益增长的数据需求；另一方面技术的革新使得以前的设备都要被替换，从而付出高昂的设备成本和建设施工成本，而且这个替换过程往往需要很长的时间。这其中主要的缘由，就是因为不同制式之间的调制方式和多址方式不同，而在当前的无线通信系统架构中，无法解决多种方式并存的问题，所以导致设备要被更新和替换才能支持新技术。我们来随便数一下这些标准的调制方式和多址方式，如表 5-1 所示。

表 5-1 多种制式

类　别	种　类
通信系统	GSM（GPRS、EDGE）、WCDMA（HSPA、HSPA+）、TD-SCDMA、cdma2000、LTE
调制方式	GMSK、QPSK、8PSK、16QAM、64QAM
多址方式	频分多址（FDMA）、码分多址（CDMA）、时分多址（TDMA）、空分多址（SDMA）

相信谁看到这么繁杂的一张表格都会感觉到头很晕，对于运营商而言，就不单单是头晕这么简单了，多种制式并存的局面造成了高昂的设备购买的资金成本和替换安装的时间成本。于是，运营商也有了一个梦想，而这个梦想并不简单，那就是："我希望我所购买的设备像孙猴子一样会七十二变，想变成 GSM 就变成 GSM、想变成 WCDMA 就变



成 WCDMA、想变成 LTE 就变成 LTE……LTE 之后，我还没有想好。”

愿望是美好的，但如何实现，还是得从现实中来。我们先看看一个基站的基本构造，从中寻找一点端倪，如图 5.33 所示。

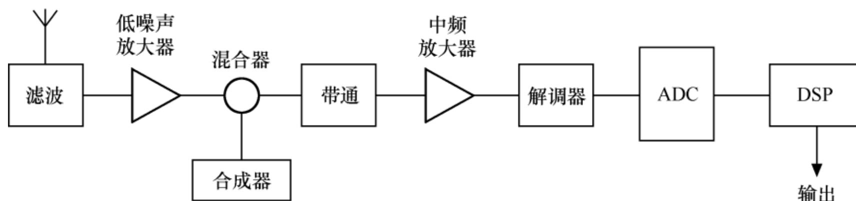


图 5.33　无线接收装置

在无线接收装置中所有的功能模块：滤波、放大、向下变频，直到调制，都是使用模拟技术（除了频率合成的部分）实现的。信号解调出来以后，使用一个可编程的数字信号处理（DSP）器件进行处理。

由于模拟器件其操作方便性和通用性远不如数字编程序列，所以软件无线电的一个关键性步骤就是将 A/D（和 D/A）变换器尽量向射频端靠拢（如图 5.34 所示，大家注意一下 AD 变换装置在图 5.33 和图 5.34 中位置的变化）。另一点就是要应用宽带天线或多频段天线，并将整个中频频段作 A/D 变换，这之后整个的处理都用可编程数字器件特别是软件来实现。它的结构图显示在图 5.35 上。我们可以看出，这样一个体系结构具有非常大的通用性，对解决上面提到的问题有很大的潜力，可用来实现多频段、多调制方式和多址方式，构成多体制的通用无线通信系统。

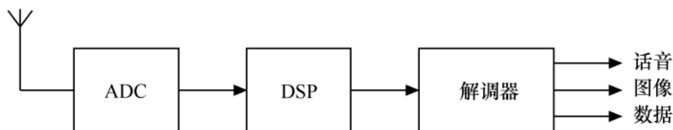


图 5.34　软件无线电接收装置

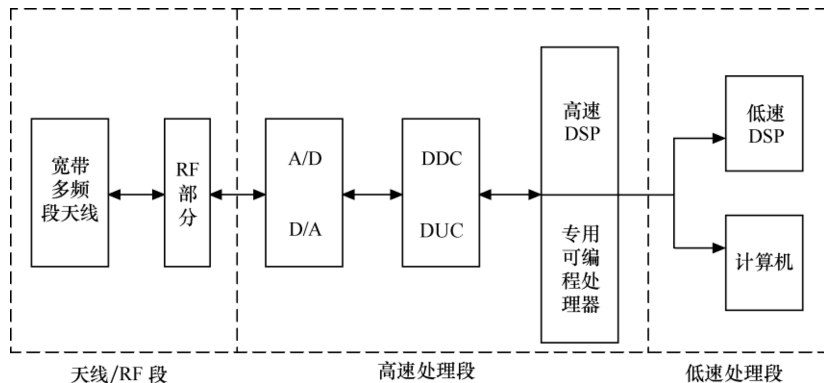


图 5.35　软件无线电结构图

从图 5.35 中可以看出，所谓软件无线电，其关键思想是构造一个具有开放性、标准化、模块化的通用硬件平台，各种功能，如工作频段、调制解调类型、数据格式、加密模式、通信协议等，用软件来完成，并使宽带 A/D 和 D/A 转换器尽可能靠近天线，以研制出具有高度灵活性、开放性的新一代无线通信系统。可以说这种无线收发信机是可用软件控制和再定义的无线收发信机，选用不同软件模块就可以实现不同的功能，而且软件可以升级更新。其硬件也可以像计算机一样不断地更新模块和升级换代。由于软件无线电的各种功能是用软件实现的，如果要实现新的业务或调制方式只要增加一个新的软件模块即可。同时，由于它能形成各种调制波形和通信协议，故还可以使得无线收发信机可以升级到新的制式，从而大大延长了无线收发信机的使用周期，也节约了成本开支。

在当前运营商的网络里，已经有不少设备支持软件无线电了。比如说中国移动 TD 二期招标，就要求所有厂家的设备可以支持 TD-SCDMA 平滑向 TDD-LTE 升级。

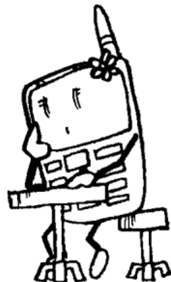
至此，我们就介绍完了 TD-SCDMA 的主要内容。由于同源于 3GPP 组织，TD-SCDMA 和 WCDMA 采取了基本相似的网络结构、设备与接口命名、协议栈结构、扩频码生成方式（上下行所采用的码字数量不同）。

作为一个时分系统，TD-SCDMA 非常注重时间同步，因此采用了 GPS 及北斗系统作为时间源。作为通信标准界的后起之秀，TD-SCDMA 凭借一系列创新的技术跻身于 3 大国际标准之列，比如上行同步、智能天线、接力切换、多用户检测、动态分配信道等。

然而，TD-SCDMA 作为中国自主创新的一个标杆，虽然成了国际主流标准，但是其设备成熟度、运营经验、普及程度还需要进一步提高，需要中国的各位通信同仁一同为之努力奋斗！

第 6 章

Chapter 6



cdma2000，高通最后的独行

“一流的企业做标准”，这句话在通信世界的语境里，往往指的是高通，高通也配得上这样的尊重。在 2G 时代，当 GSM 都已经蔚然成型之时，当时还只是北美的一家小公司的高通斜刺里杀出来，硬是凭着 CDMA 闯出了一番天地。不仅如此，CDMA 还成了 3 大 3G 标准——WCDMA、TD-SCDMA、cdma2000 空中接口共同的基础，高通也因此一跃成为通信界的巨头。

在 2G 时代和 3G 时代，高通及其支持阵营都没有选择入盟欧洲制定的主流通信标准——GSM 和 WCDMA，而是坚持走自己的路，开创了 IS-95 和 cdma2000，并取得了相当的成功。然而，正当人们以为高通在后 3G 时代也将继续特立独行之时，高通首席执行官 Paul E.Jacobs 却在 2008 年 11 月 19 日正式宣布——高通将放弃新一代移动体通信规格“超移动宽带（UMB，Ultra Mobile Broadband）”的商业化开发，人员今后将被分派到 LTE 和 LTE-Advanced 等的开发中。也就意味着一直扮演独行侠的高通公司，在未来的长期演进中放弃了自己的 UMB 路线，改投了 LTE 阵营。这一关键事件标志着 3GPP 和 3GPP2 的标准化工作开始融合，并共同演进到 IMT-Advanced 标准。而 cdma2000 标准也成了高通公司在无线通信领域最后的独行，不禁令人唏嘘不已。

cdma2000 技术是 3 大 3G 标准之一。其实早在 1985 年，FPLMTS（Future Public Land Mobile Telecommunication System，未来公众陆地移动通信系统）就对未来的第三代移动通信做出了展望，也就是我们在前面的章节里提到的那几个“任何”，在任何时间、任何地点和任何人进行任何种类的信息交换。FPLMTS 给我们画了一张大饼，但并没有说具体的细节如何实现。

1996 年，FPLMTS 换了个马甲，改名叫 IMT-2000（International Mobile Telecom System-2000，国际移动电话系统-2000）。你有时候不得不承认这个名字取得相当之艺术，因为它的主要内容就是 3 个“2000”。

（1）系统工作在 2 000MHz 频段（基本差不多，但是 UMTS 也有工作在 900MHz 上

的，cdma2000 也有工作在 800MHz 上的）。

（2）最高业务速率可达 2 000kbit/s（2Mbit/s 的速率，当时看已经非常快了，毕竟 1996 年的互联网带宽才多少？现在看来太保守了，3 大标准早已迈过这条线，而且在不断刷新峰值速率纪录）。

（3）预期在 2000 年左右得到商用（有点乐观，实际推后了不少）。

为了达到这几个目标，1998 年 12 月成立了 3GPP 组织，包含了欧洲大名鼎鼎的 ETSI（European Telecommunications Standards Institute，欧洲电信标准协会，就是捣鼓出 GSM 的那个组织）、日本的 ARIB（Association of Radio Industriesand Business，无线工商协会）、韩国的 TTA（Telecommunication Technique Association，电信技术协会）和美国的 T1 等机构，这个组织主要研究 GSM 的演进，而没有考虑北美的 CDMA 知识的演进与发展。

3GPP 这样的组织目标显然和高通及其盟友的利益不符，因此 1999 年 1 月，3GPP2 组织也成立了，主要由美国的 TIA（Telecommunication Industry Association，电信工业协会）、日本的 ARIB、韩国的 TTA 等机构组成。3GPP2 沿用了以前 CDMA IS-95 的体系，以 cdma2000 作为空中接口的标准，核心网沿用 ANSI-41 为标准。

1999 年 11 月在 ITU 的一次会议上，确定了 IMT-2000 的无线接口技术规范，确定的规范有 5 种，其中有 3 种技术成为主流，也就是闻名于世的 WCDMA、cdma2000、TD-SCDMA。

鉴于我们之前已经介绍过 WCDMA 标准和 TD-SCDMA 标准，在开始本章的正文之前，不妨先列举一个 3 大标准的基本对比，如表 6-1 所示。

表 6-1 主要 3G 制式比较

标　　准	WCDMA	cdma2000	TD-SCDMA
采用国家和地区	欧洲、日本	美国、韩国	中国
继承基础	GSM	CDMA IS-95	GSM
核心网	GSM MAP	ANSI-41	GSM MAP
工作频段	1 940～1 955MHz（上行）	1 920～1 935MHz（上行）	1 880～1 920MHz
	2 130～2 145MHz（下行）	2 110～2 125MHz（下行）	2 010～2 025MHz
双工方式	FDD	FDD	TDD
多址方式	FDMA+CDMA	FDMA+CDMA	FDMA+CDMA+TDMA+SDMA
载波带宽	5MHz	1.25MHz	1.6MHz



续表

标　　准	WCDMA	cdma2000	TD-SCDMA
码片速率	3.84Mchip/s	1.228 8Mchip/s	1.28Mchip/s
峰值速率	14.4Mbit/s（下行）	3.1Mbit/s（下行）	2.8Mbit/s（下行）
	5.76Mbit/s（上行）	1.8Mbit/s（上行）	384kbit/s（上行）
基站间同步	异步	同步（GPS）	同步（GPS、北斗）
功率控制	快速功控（1 500Hz）	上行：800Hz	0～200Hz
		下行：慢速、快速功控	

说到多址方式，3 大 3G 标准除了 CDMA 以外都还有 FDMA，其实无线通信标准一般都会有 FDMA 这个概念。TD-SCDMA 还加了个 TDMA 和 SDMA（Space Division Mutiple Access，空分多址）。所谓 TDMA，指的就是 TD-SCDMA 在时间轴上分为 3 个特殊时隙和 7 个业务时隙的事情，跟 GSM 划分时隙有那么点类似；所谓 SDMA，指的就是 TD 里面的智能天线，由于智能天线能对用户进行跟踪定位，因为可以从空间上将用户区分出来。

接下来我们看到基站间同步，TD-SCDMA 由于是时分双工系统，必须得有基站之间的同步，否则基站之间就会互相干扰，这个原因我们在前面的章节里已经讲述过了。但是我们从表 6-1 发现，cdma2000 这个频分双工系统居然也需要基站之间同步，那么 cdma2000 为什么需要基站之间同步呢？我们稍后再解释原因。

在本章里，我们不妨沿着 CDMA 的发展轨迹，也即 IS-95、CDMA 1X、EV-DO、EV-DV 这样的顺序来阐述 CDMA 的演变过程。CDMA 的历程很有味道，因为它有两条脉络清晰的线索可循，第一条线索是需求，IS-95 的出现是为了解决通话问题；当这个问题解决之后，发现人们有上网的数据需求，但是不大，于是出现了上网速度比较慢的版本，CDMA 1X；后来发现大家希望能够通过无线网络随时随地下载东西、看视频、看电视直播，CDMA 1X 那点速率显然不够了，于是出现了高速版本——EV-DO 和 EV-DV。第二条线索是 3GPP2 与 3GPP 的 PK，目前世界上用得最多的两大移动通信标准体系即欧洲的“GSM 体系”和北美的“CDMA 体系”，IS-95 与 GSM、CDMA 1X 与 GPRS、EDGE，EV-DO、EV-DV 与 WCDMA、HSDPA 之间都呈现出明显的竞争关系，而且技术层面相互也有很多借鉴，可以放到一起对比着去看，这样能有不少收获，所以读者在看本章的时候，一定要时时记住这两条线，顺着这两条线去理，将会更好地理解本章的内容。

6.1 CDMA，高通发现新大陆

在 CDMA 的历史上也好，在 3G 的历史上也罢，都有一个绕不过去的名字——高通（QUALCOMM），这个名字的意思是“quality communications”，高通希望让高质量的通信成为推送整个社会发展的动力。

虽然是高通将扩频通信发扬光大，但扩频通信技术最初并不是源自高通，而是源自那个著名的演员及科学家海蒂·拉玛，出于有效控制鱼雷行进方向的目的她创立了扩频通信，而扩频通信技术最初也广泛应用于军事和航空系统中。1977 年，库铂（R.G.Cooper）和内特尔顿（Nettleton）首先提出利用扩频技术实现 CDMA 的方案，使蜂窝移动通信的频谱效率提高。但由于当时的数字无线技术和移动通信的市场均未成熟，因此没有能够投入使用。

1988 年 9 月，美国蜂窝通信工业协会（CTIA）提出了下一代蜂窝网的用户性能需求，这些要求主要包括：

（1）系统容量至少是模拟通信网 AMPS 的 10 倍；

（2）通信质量等于或者优于模拟的 AMPS；

（3）能够充分引入新业务（相比以前，呼叫等待、彩铃之类都算是新业务）；

（4）具有话音和数据保密能力（这算是数字通信的优势）；

（5）易于过渡并和现有的模拟系统兼容；

（6）采用开放的网络结构。

在当时的北美大陆，TDMA 正如火如荼，并且 1992 年美国蜂窝电信工业协会一致决定 TDMA 是美国移动网络的标准，这几乎意味着美国对高通的 CDMA 技术关闭了大门。然而经过实际论证，发现已经被批准的 TDMA 的标准（IS-54）并不能完全满足上面所列的这些要求，尤其在容量上，跟 CTIA 提出的要求差距还比较大。于是，这给了高通一线生机。

从 1988 年到 1995 年这段时间里，高通一直在为 CDMA 孤独地抗争，以求 CDMA 技术和系统被学术界、设备商、运营商甚至公众所接纳。这也并不奇怪，因为之前 CDMA 技术只是用于军事通信，其主要用途就是用来进行保密通信，其他作用并不在人们的视线中。要说 CDMA 还可以同频组网，其容量还比 TDMA 网络大好几倍，这些未经过验证的理论上的东西虽然听起来很美妙，但是实在很难让人们信服。而且，实际上高通当时还并未解决 CDMA 网络的一个致命伤——“远近效应”。

但是高通并没有放弃努力，而且坚信自己一定可以成功。高通从 1989 年开始就聘请



公关公司启动了维持数年的公关推介项目，让高通的声音出现在任何可能的场合；为了在学术界获得影响力，高通的专家在 IEEE 不断推出重磅的 CDMA 学术论文；为了加速 CDMA 系统的外场试验进程（摩托罗拉和朗讯因为在 TDMA 上投资巨大起初并不支持 CDMA），高通不得不投资介入高通并不擅长的系统和终端设备制造领域，为运营商的测试提供早期设备；为了改变产业链支持不足的情况，高通又冒险进入芯片设计领域进行了巨额投资。直到高通终于通过功率控制和软切换解决了远近效应的问题之后，这种局面才发生了逆转。1993 年美国电信工业协会（CTIA）将高通提出的 CDMA 确定为一个暂定的标准。1995 年经过修改和完善后，正式颁布了窄带 CDMA 标准，这也是 CDMA 的第一个标准，叫做 IS-95A，这个名字又跟年份有关。1995 年下半年，中国香港开通了全世界第一个 IS-95A 商用网络，高通持续的努力终于获得了回报！1995 年，这距离高通公司创立已经有 10 年了，距离高通首次提出 CDMA 的理念也有 8 年了，漫长地等待，苦苦地抗争，才终于换回了 CDMA 的开花结果，个中滋味可谓如人饮水，冷暖自知。

IS-95A 主要是为了解决话音问题而设计的，在 IS-95A 系统中，所有小区可以采用相同的频率，即频率复用因子为 1，频谱使用效率是 GSM 系统的 3～5 倍。随着 IS-95A 的商用，市场上对于较高速率数据业务的需求逐渐显现出来。基于这种需求，在 IS-95A 的基础上，又产生了一系列新的标准，主要就是 IS-95B。IS-95B 的核心思想就是在不改变 IS-95A 的基本架构基础上通过捆绑几个信道来提供数据业务，其支持的最高速率为 115.2kbit/s。出于种种原因，IS-95B 只是昙花一现，并没有在现网中大规模商用。它的下一个版本，是一时风头无两的 CDMA 1X。

2000 年 5 月，国际电信联盟—无线标准部（ITU-R）最终通过了 IMT-2000 无线接口规范，其中就包括美国电信工业协会（TIA）提出的 cdma2000。有好几种技术其统称都是 cdma2000，比如说 CDMA 1X、CDMA 1X EV-DO、CDMA 1X EV-DV、CDMA 1X 其实是 cdma2000 发展的第一个阶段，通常也叫做 2.5G 网络，其全称应该叫 cdma2000 1x。CDMA 1X 的速率并没有达到 IMT-2000 的要求，其最高速率只有 307.2kbit/s，这就催生了 CDMA 1X 的继续演进。

CDMA 1X 的后续演进有两个版本，其中一个版本称为 cdma2000 1x EV-DO。所谓 EV-DO 其实包含了 3 个单词，Evolution（演进）、Data、Only。从字面意思就能看出，这是一个纯粹用于数据的版本，其核心思想就是通过与话音业务使用不同的独立载波来提供高速数据业务，其最初版本下行链路数据速率最高可达 2.4Mbit/s，上行链路最高速率可达 153.6kbit/s。在其后续版本中也演进到了下行 3.1MHz，上行 1.8MHz。这也是现网应用的最多的一个版本，比如中国电信就采用的此版本。

EV-DO 其想法是有道理的，话音和数据业务特点是有很大不同的，将其分开由不同

的载波承载是更有效率，但这样一来就需要在原来的基础上再增加载波，对于许多小运营商而言，用户数和网络负荷都不大，为了支持数据业务就要再花笔钱增加一个载波，显得很不划算。于是，就有了另一个方案，叫做 EV-DV。

EV-DV 的全称叫做 cdma2000 1x EV-DV，DV 即指 Data&Voice，意思是系统可以同时支持高速分组数据业务和实时业务，在一个载波上传输实时、非实时和混合业务。其下行链路数据速率最高可达 3.1Mbit/s，上行链路最高速率可达 1.8Mbit/s。

到这里，我们不妨来理一理 CDMA 的各个版本，并将其与 GSM 进行一下对比，有助于加深大家的印象，如图 6.1 和图 6.2 所示。

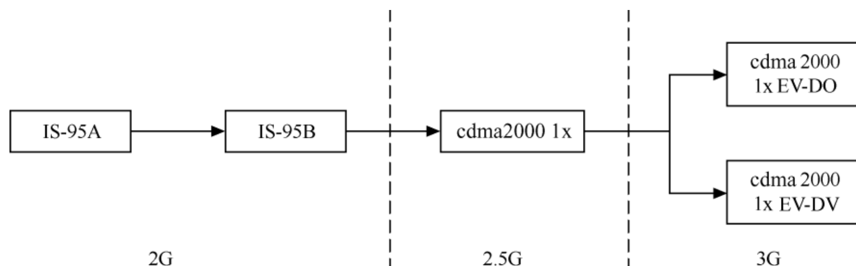


图 6.1　cdma2000 演进策略

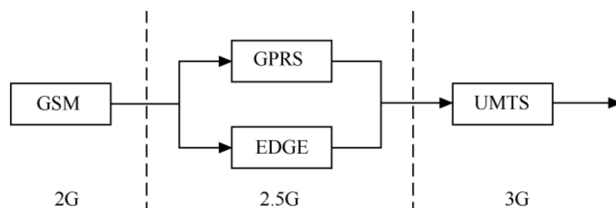


图 6.2　UMTS 演进策略

下面我们就来对 cdma2000 进行分版本的一一阐述，由于 cdma2000 各个版本之间都有着紧密的联系，而且都是为了解决某些问题而演化出来的，因此通过这条线往下捋我们会对 CDMA 有一个比较清晰的思路和一个比较全面的认识。

6.2 IS-95 横空出世

我们首先来看看 IS-95 的网络结构，由于在本章中会反复拿 GSM、GPRS、WCDMA 的网络结构图来和 CDMA 进行对比，因此再用前几章那种有型有样的示意图出来就容易看得人眼花，不太容易辨别彼此的差别。因此，在本章中，涉及网络结构的地方，一律都采用框图，这样看起来会比较方便。



6.2.1　与 GSM 同场 PK

IS-95 面世后的第一个对手，就是来自欧洲的 GSM。这并不奇怪，在美国还在 TDMA 和 CDMA 之间摇摆的时候，就有来自欧洲的 ETSI 游说美国采用欧洲标准 GSM。如果这一策略得以实施，那么我们今天看到的移动通信或许已经是大一统的局面。但美国为了在这一战略领域发出自己的声音，还是选择了 CDMA。

1995 年，美国运营商、朗讯、北电、摩托罗拉等企业开始全面支持 CDMA，CDMA 正式走出美国，在全球范围内和 GSM 大打出手。但由于动作还是比 GSM 慢了一步，CDMA 到现在为止全球份额依然远不如 GSM。

GSM 和 CDMA 虽然出自不同的大洲和不同的组织，但是由于通信最基本的原理是相通的，因此两种标准之间还是有诸多相似的地方，我们不妨来看一下，如图 6.3 所示。

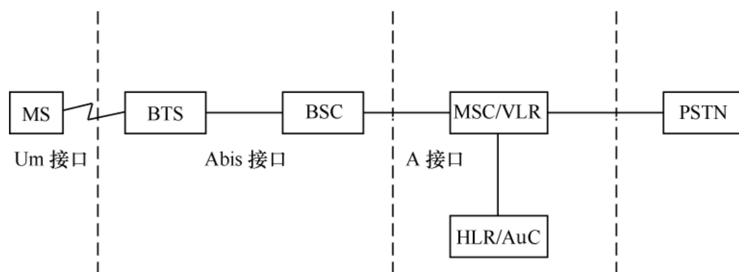


图 6.3　CDMA？GSM？

看到图 6.3，可能大家要问，这到底是 GSM 网络还是 CDMA 网络？因为无论是设备名称还是接口名称，都跟 GSM 网络一模一样。没错，这就是 IS-95 的基本结构，包括设备功能的定义，也与 GSM 网络基本无二致。不过大家也看到了，CDMA 创立之初跟 GSM 一样，并没有去考虑上网和数据业务需求，图 6.3 中是纯电路域的东西，并没有涉及分组域。等到 GSM 和 CDMA 分别考虑数据需求之后，它们就演进成了 GPRS 和 CDMA 1X，这个时候差别开始凸显出来，我们稍后再述。

既然网络结构一样，那么 GSM 和 IS-95 其主要差别在哪里呢？看到第 6 章了，我想读者应该很容易回答出这个问题，那就是图 6.3 中那个 Um 接口，也即空中接口。

IS-95 的工作频段为 800MHz，具体到中国就是上行 825～835MHz，下行 870～880MHz。这比 GSM 900MHz 的频段要更低一些，所以其绕射性能更好，覆盖范围更广，是不折不扣的无线通信的“黄金频段”。

IS-95 其码片速率为 1.228 8Mchip/s，一个载波的带宽为 1.25MHz。这两个数据直到后面的 CDMA 1X、EV-DO、EV-DV 都没有发生变化，继承性做得非常好。GSM 是没有码片速率这一说的，不过大家可以看看表 6-1，对比一下 WCDMA 和 TD-SCDMA 的相

关数据。

IS-95 也是采用的 Walsh 码作为扩频码，如图 6.4 所示。

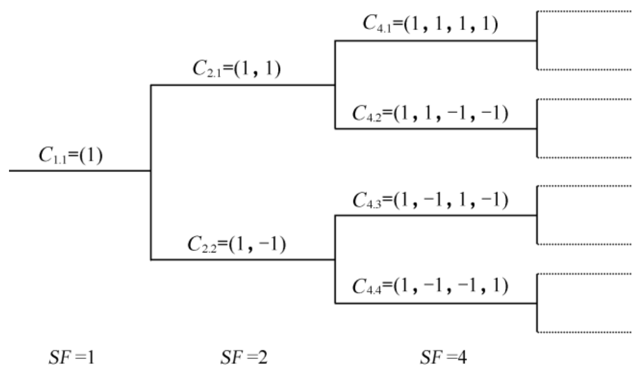


图 6.4　Walsh 码

这个 Walsh 码算是我们的老熟人了，之前的 WCDMA 和 TD-SCDMA 中都有它的身影。不过在 IS-95 里，它用的方式有所不同。在 WCDMA 和 TD-SCDMA 里面，都采用的是可变扩频因子，WCDMA 下行可以在 4～512 之间变化，上行可以在 4～256 之间变化；TD-SCDMA 下行可以在 1 和 16 两个扩频因子之间选择，上行可以在 1、2、4、8、16 之间选择。而 IS-95 的方式要简单得多，采用的就是 $SF = 64$ 的固定扩频因子，共有 64 个码，记作 W_0^{64}，W_1^{64}，W_2^{64},…，W_{63}^{64}。因此，可提供的码分物理信道也是 64 个，从 W_0^{64} 到 W_{63}^{64}。

如果把 Walsh 码资源比喻成一块大蛋糕，那么 WCDMA 和 TD-SCDMA 都是采取的比较灵活的切法，WCDMA 可以把蛋糕切成 4～512 块，TD-SCDMA 可以把蛋糕切成 1～16 块，然后根据大家的需求不同分配不同大小的蛋糕。而 IS-95 则不管三七二十一，冲上来就把蛋糕切成 64 块，然后再把蛋糕分给大家。看起来还是 IS-95 的切法最不科学，那么 IS-95 为什么会选择这种做法呢？

那是因为 IS-95 创立之初只考虑了话音需求，还没有去考虑数据需求，大家也知道传送话音需要多大的流量基本是比较固定的，所以 IS-95 采用这样的码字分配方式也就不奇怪了。随着 CDMA 往后发展，开始考虑数据需求之后，扩频因子也改成了可变的。

根据扩频因子的大小，以及调制方式的相关信息我们也不难算出一个物理信道的容量。假设扩频因子为 64，下行调制方式为 BPSK，那么信道容量 1.228 8Mchip/64 = 19.2kbit/s，如果采用 1/2 卷积编码，那么真正的业务数据量就是 9.6kbit/s，这就是 CDMA IS-95 中一路话音所采用的编码速率为 9.6kbit/s 的来历。在 CDMA IS-95 中，话音的速率可以由声码器来判断并加以改变，分为两个速率集，如表 6-2 所示。这种可变速率与 GSM 话音采用固定速率有很大不同。



表 6-2　　　　　　　　　　支持话音速率

速率集（Rate Set）	支 持 速 率
RS1	9.6kbit/s、4.8kbit/s、2.4kbit/s、1.2kbit/s
RS2	14.4kbit/s、7.2kbit/s、3.6kbit/s、1.8kbit/s

6.2.2　为啥 cdma2000 也需要 GPS

我们知道，TD-SCDMA 是需要 GPS 的，因为 TD-SCDMA 是一个时分双工系统，时分双工则意味着上下行频率相同。为了避免不同基站之间上下行时隙互相干扰，这些基站必须同步，必须有统一的时间，这个统一的时钟源就由 GPS 来提供。cdma2000 可不是什么时分双工系统，可没有什么上下行时隙交叉干扰问题，它为啥也要凑这个热闹，也非要整个 GPS 挂在基站天线旁边呢？

我们知道，扩频码其作用在于区分一个 CDMA 载频下的不同信道，不同的信道就好比一支足球队里不同的球员，需要通过球衣号码来进行区分，而扩频码就扮演了球衣号码的角色。

然而光有球衣号码是不足以区分一个球员到底是谁的，譬如巴西队和法国队在踢一场比赛，场上就有两个 10 号（两个相同的扩频码），你如何分得清谁是谁？这不仅对我们球迷是一个挑战，对裁判也是一个挑战，所以球场上又有一个规定，同一场比赛的不同球队应该穿容易区分的不同颜色的球衣来参加比赛。于是，我们就很容易分辨了，穿黄色球衣的 10 号是巴西队的罗纳尔迪尼奥，穿蓝色球衣的 10 号是法国队的齐达内。

既然两支不同的球队可以通过球衣的颜色来进行区分，那么两块不同的 CDMA 载频自然也有办法进行区分，那就是我们之前在 WCDMA 那一章中介绍过的，通过扰码来区分不同的小区。

在 WCDMA 里面，通过 Gold 序列码来区分不同的小区；在 CDMA IS-95 里面，是通过 m 序列来区分不同的小区。CDMA IS-95 中所有的基站都使用一队短码序列，区分基站是利用短码序列的不同时间偏置来完成的，这样一来简是简单了，新的麻烦又来了。这就好比球场上的足球队穿的衣服都是“绿、墨绿、浅绿、淡绿、翠绿”，对颜色的理解稍微有点偏差就不好辨别了。为了解决这个问题，国际足联给每个裁判都发了一张颜色比对卡，以这张颜色比对卡为基准，来对球衣的颜色作为判断。

由于不同的小区是用 m 序列的不同偏置来进行区分，所以这个方案能够得以实施的前提条件是所有基站必须是同步的，如果不同步，那么很可能有些基站时间会出现稍稍的

位移，从而使得偏置的位置变得相同，那么就会此路不通了。基站之间的同步，也需要下发一个时间标准，下发这个时间的标准叫做 GPS。时间标准的作用就好比上文中所说的国际足联发的颜色对比卡。

应当说这个 GPS 的使用并不是很方便，它需要每个基站增加一个 GPS 天线，如图 6.5 所示。大家知道，GPS 一般在比较空旷的地方使用效果比较好，当天线放到室外的时候，这自然不是什么问题，GPS 跟着走就是了。但是做室内覆盖的时候，天线是需要放到室内的。而 GPS 天线又要放到室外，这就给施工带来了很大的麻烦。



图 6.5　GPS 天线

6.2.3　蛋糕怎么切—　IS-95 的信道问题

我们刚才说了，IS-95 中一共有 64 个信道，那么这 64 个信道是用来做什么的呢，我们不妨来说明一下。

（1）W_0——导频信道（Pilot Channel）：几乎所有移动通信制式第一个信道都是用来做导频的。所谓导频，Pilot，顾名思义，就是引导手机锁定载频。就是基站吆喝嗓子让手机知道自己的存在，从而好让手机锁定自己小区载频的频道的。理由很简单，频道都没锁定，你难道还指望手机接下来收看你接下来的节目？这一嗓子吼什么为好呢，自然是越简单越好，越简单，别人判断起来才越不容易错。所以，在当前几个移动通信标准里，这个信道采用的都是全 0 序列。

在 GSM 里面，完成这个工作的叫做 FCCH 信道；在 WCDMA 里面，叫做 P-CPICH 信道；在 TD-SCDMA 里面是用 DwPTS 这个特殊时隙来进行导频。

（2）W_{32}——同步信道（Synchronizing Channel）：在无线通信里，定时总是一个非常重要的事情，手机和无线系统之间必须要有统一的时间，像“0011101010101”这样的比特流，要是错位了的话是没有办法解出的。因此，同步信道在所有移动通信标准里面都是需要的。

在 GSM 里面，完成这个工作的叫做 SCH 信道；在 WCDMA 里面，完成这个工作的叫做 P-SCH 信道和 S-SCH 信道；在 TD-SCDMA 里面，同步和导频采用的是同一个信道，也是在 DwPTS 这个特殊时隙里完成的。

（3）W_1～W_7——寻呼信道（Paging Channel）：所谓寻呼，相信大家都已经很清楚它的作用了，就是一个寻人启事。基站子系统需要在某个区域广播这样的寻呼消息来找到某一个手机，手机收到寻呼消息之后自己接入网络，这样就完成了被叫过程。在当前的移动通信体系下，寻呼也是必不可少的。

在 GSM 里面，完成这个工作的叫做 PCH 信道；在 WCDMA 和 TD-SCDMA 中，是通过 S-CCPCH 信道来完成这个工作的（S-CCPCH 是物理信道，其对应的传输信道也是 PCH）。



但是 IS-95 这里有个比较独特的地方，就是它没有广播信道（BCH），它的什么系统参数消息、接入参数消息、邻区列表信息等等诸如此类的，通通都是通过寻呼信道来发送，这算是一个比较特殊的地方。

（4）剩下的 55 个信道——业务信道：其实上面说的（1）、（2）、（3）都是为了（4）服务的，如果没有业务信道（承载话音和数据业务），那么其他的一切信道都没有存在的价值。

到这里，我们就介绍完了 CDMA IS-95 的下行链路。在这里做一个简单的总结，如图 6.6 所示。

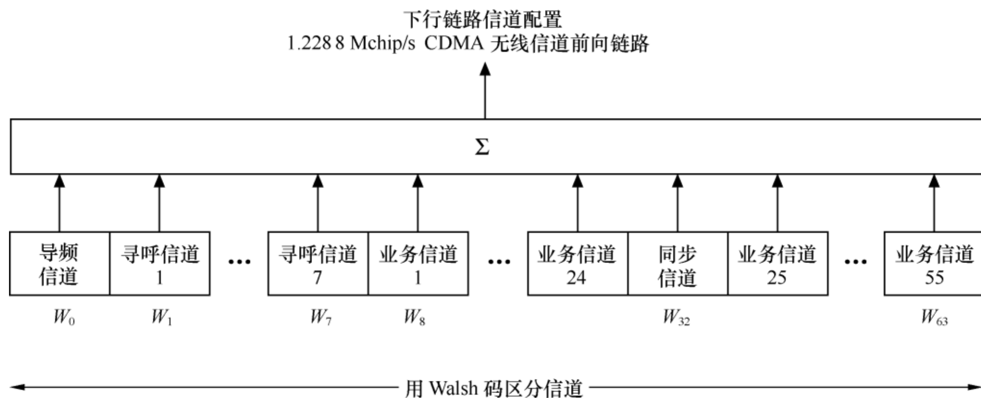


图 6.6　IS-95 下行链路配置

至于上行链路，信道配置比较简单，只有两种，一种是接入信道，另一种是业务信道。大家可以参考 GSM 和 WCDMA 里面的这两种信道，就不在这里多说了。

IS-95A 有一个很大的缺陷，就是不支持数据业务。为了弥补这个缺陷，1998 年 12 月，出了一个 IS-95B 的新版本，其核心思想就是通过电路域来提供数据业务，最多可以捆绑 8 个信道。因为种种原因，IS-95B 的商业应用很少，就不在这里详述了。真正开始广泛应用并支持数据业务的，要数 CDMA 1X，它的地位与 GSM 中的 GPRS 相当，我们来看看 CDMA 1X 相对 IS-95 做了哪些改进。

6.3 冤家路窄— CDMA 1X 与 GPRS

我们在上一节里说了，IS-95 也好，GSM 也罢，考虑的都是话音的需求，没有去考虑数据业务的问题，因为那个时候互联网也刚刚兴起，谁能想到日后互联网业务是如此地蓬勃发展，数据流量更是如此地激增。

但 IS-95 应用后不久，数据需求开始显现出来了，为了应对日益增长的数据需求，cdma2000 应运而生，cdma2000 的第一个阶段就叫做 cdma2000 1x，其实除了这个 cdma2000 1x 之外还有一个 cdma2000 3x。1x 和 3x 的主要区别就是 1x 指的是一个载波，3x 是把 3 个载波捆绑起来，通过更大的带宽来实现更高的速率。当前的主流版本都是 1x，所以我们在这里也只介绍 1x。

在 cdma2000 1x 推出前后，GSM 版的数据解决方案 GPRS 也正式商用了，真可谓不是冤家不聚头。

6.3.1 花开两朵，各表一枝

对于 CDMA 1X 和 GPRS，相信中国的很多人都并不陌生。在很长一段时间里，这两者是中国联通和中国移动在数据业务上对撼的主力。

cdma2000 设计之初就考虑了向下兼容，这与 GSM 的后续演进版本 WCDMA 有着本质的区别。具体说来，就是你拿着一个 IS-95 的手机在一张纯 cdma2000 网络里，或者拿一个 cdma2000 的手机在一张古老的 IS-95 网络里，都是可以打电话的。而你拿一个 GSM 的手机在一张 WCDMA 的网络里，或者拿一个纯 WCDMA 手机，在一张 GSM 的网络里，都是打不了电话的。当然，现在基本没有纯的 WCDMA 手机，都是 GSM/WCDMA 双模的，所以 WCDMA 的手机无论在 GSM 网络还是 WCDMA 网络里都可以打电话。而 GSM 手机，则是无法在 WCDMA 网络里用的。

cdma2000 向下兼容又包括两方面，一方面指的是空中接口的设计上，它保持了许多 IS-95 的特征与信道，确保与 IS-95 的兼容，又新增了一部分信道，用来支持高速数据业务；另一方面指的是核心网，在核心网的电路域，保持了和 IS-95 的核心网 ANSI-41 完全一样的结构，为了支持分组数据业务，又新增了一个分组域核心网。我们来看看核心网和空中接口分别有哪些变化和继承。

6.3.2 英雄所见略同— 核心网的继承与变化

GSM 到 GPRS 的演进过程几乎和 IS-95 到 1x 的演进过程完全一样，GPRS 在空中接口也保持了 GSM 的信道和特性，然后新增了部分信道用于支持数据业务。在核心网层面，GPRS 也没有改动 GSM 的电路域核心网，而是新增了一个分组域核心网。我们通过图 6.7 与图 6.8 来对比一下 GSM 和 CDMA 在增加分组域时的变化。

我们看到，为了支持分组业务，cdma2000 1x 相对 CDMA IS-95 网络增加了 3 个网元，分别是：

（1）PCF（Packet Control Function，分组控制功能）：用来负责与分组数据业务有关的无线资源的控制。大多数厂家开发产品的时候，将它与 BSC 做在一起，因此通常把它



理解为无线接入网的部分。

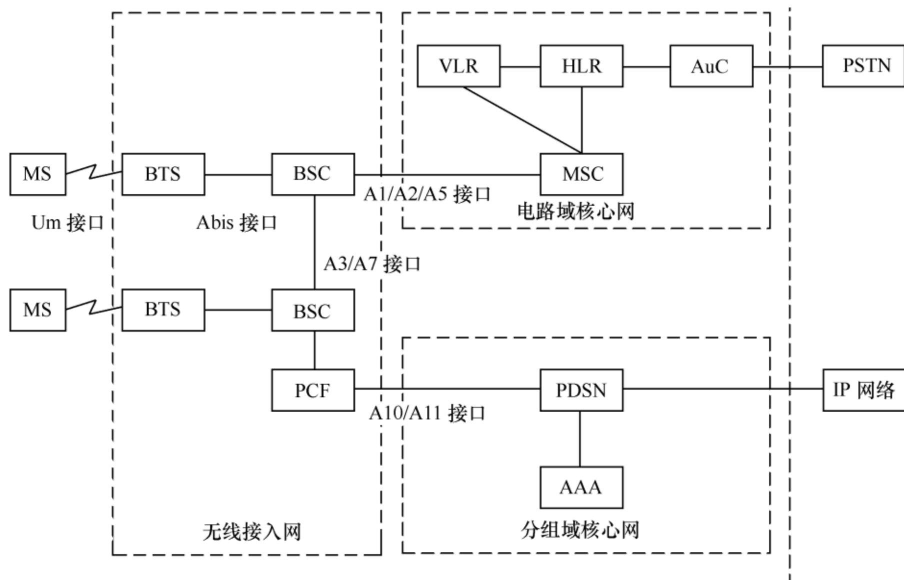


图 6.7　cdma2000 系统结构

（2）PDSN（Packet Data Serving Node，分组业务数据节点）：PDSN 一头连着无线接入网，另一头连接外部的 IP 数据网。其主要作用就是维护与移动台之间的无线数据连接，分配 IP 地址，并把数据包转发出去。

（3）AAA 服务器（Authentication、Authorization、Accounting，鉴权、授权、记账服务器）。三个 A 的英文全称很好地阐释了它的基本功能，它很有点电路域的 HLR 加 AuC 的味道，可以管理用户的权限和开通的业务等信息，提供用户身份的认证和授权服务以及计费等业务。

以上三个网元就是 cdma2000 的基本配置，还有更复杂的包含 HA 和 FA 设备，不过现网应用比较少一点，中国电信也是采用的基本配置，所以在此不再加以详述。

我们再来看看 GPRS/EDGE 的网络结构，如图 6.8 所示。

通过图 6.7 和图 6.8，我们可以看到，cdma2000 1x 网络相对 GPRS/EDGE 网络有几个变化。

（1）BSC 之间有接口，这个在 GPRS/EDGE 网络里是没有的，因为 CDMA 制式的网络需要支持软切换，软切换就必然会出现一个手机连接了不同 BSC 下的基站的情况。因此 BSC 和 BSC 之间需要有接口。BSC 和 BSC 之间有两个接口，分别叫 A3/A7 接口，其中 A3 接口传递业务，A7 接口传递信令。

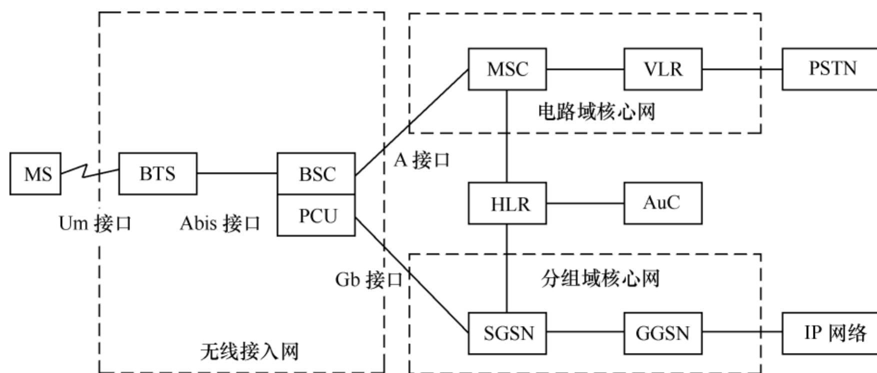


图 6.8　GPRS/EDGE 网络结构

（2）在 CDMA 网络电路域和分组域的鉴权是分开的，大家可以看到在 GPRS/EDGE 网络里 SGSN 都跟 HLR/AuC 有直接的链路相连接。而在 CDMA 网络里，PDSN 与 HLR 没有直接相连的，所以在 CDMA 网络里又增加了一个新的鉴权设备，叫做 AAA 服务器。

（3）接口对应关系。在 GPRS/EDGE 网络里，BSC 和 MSC 之间的接口叫做 A 接口；在 cdma2000 网络里，分别叫做 A1/A2/A5 接口，其中 A1 传递的是控制信令部分，A2 传递的是话音部分，A5 传递的是 64kbit/s 的电路型数据。在 GPRS/EDGE 网络里，PCU 与 SGSN 之间的接口叫做 Gb 接口；在 cdma2000 网络里，分别叫做 A10/A11 网络，其中 A10 负责传递业务，而 A11 负责传递信令。

（4）设备对应关系。在无线接入网这一侧，在 GPRS/EDGE 网络里负责处理分组数据业务的叫做 PCU，在 cdma2000 网络里叫做 PCF，两者的功能没有什么不同，不过是叫法略有差别而已；cdma2000 网络的 PDSN 功能相当于 GPRS/EDGE 网络的 SGSN 加上 GGSN，无外乎建立数据连接和转发数据包而已；至于 AAA 服务器，我们在上文中已经说过了，相当于分组域的 HLR 加上 AuC。

我们看到，CDMA 1X 网络和 GPRS 虽然有分组域核心网的网元和各种接口的叫法上的不同，但是其根本思想都是一致的，那就是不改动已有网络的电路域，通过增加分组域的方式提供数据业务，在空中接口上，都采取了向下兼容的方式，不修改已有物理信道，而是通过新增物理信道的方式来提供数据业务。

6.3.3　更快更高更强— 空口的蜕变

在上面的内容中主要阐述了 CDMA 1X 相对 IS-95 在核心网侧的变化，在这一部分里面我们主要来谈谈空中接口的变化。

（1）空中接口的第一个变化就是把“切蛋糕”的方式改变了，CDMA 1X 不再像 IS-95 那样均匀地将码资源切成 64 块，而是顺应潮流，改成了可变扩频因子，从 4～128 不等。



这样，数据速率高的用户就可以占用较小的扩频码，比如 $SF = 16$ 或者 $SF = 8$ 什么的；而数据速率较低用户就可以用数字较大的扩频码，比如 $SF = 64$ 或是 $SF = 128$。这样就使得无线资源的利用可以比 IS-95 更为灵活。

（2）空中接口的第二个变化就是引进了新的调制方式，具体说来，也就是在下行引进了 QPSK 调制方式。由于下行链路原来的调制方式是 BPSK，因此引入 QPSK 之后容量从理论上来说可以增加一倍。

（3）空中接口的第三个变化是支持可变的帧长。在 IS-95 的时候仅仅支持 20ms 的帧长，到了 1x 之后可以支持 5ms、20ms、40ms 和 80ms 的帧长。5ms 的帧长显然是应对交互类数据业务的，有的数据业务数据量并不大，但需要很短的反应时间，比如说魔兽争霸这样的网络游戏，PK 都是在电光火石之间，网络响应是速度快一点还是慢一点对玩家的感知是完全不同的。

（4）空中接口的第四个变化是增加了下行链路的无线配置（RC，Radio Configuration）。无线配置你可以理解为无线链路的相关参数，这些参数可不只是一个速率问题，它包含了编码方式和调制方式等因素。我们可以拿汽车来对比，汽车的参数肯定不止最高时速这么一条，它肯定还包括所占空间（两厢还是三厢）、驱动方式（两轮还是四轮），等等。在 IS-95 中我们已经提到了它有两种最高速率，分别为 RS1——9.6kbit/s，RS2——14.4kbit/s。到了 CDMA 1X，就不止这两种最高速率了，在列出最高速率的同时，我们不妨也列举一下与这个最高速率相关的编码方式和调制方式等，这些参数和最高速率一起构成了无线配置 RC。在这里为了简单起见，我们只列举下行链路的情况，上行链路和下行链路的情况类似，请大家自行查阅相关资料，具体内容如表 6-3 所示。

表 6-3　　　　CDMA 1X 前向链路业务信道 RC 及其特性

RC	支持制式	最大速率	信道编码方式	调制方式
1	IS-95　CDMA 1X	9.6kbit/s	1/2（卷积码）	BPSK
2		14.4kbit/s	1/2（卷积码）	BPSK
3	CDMA 1X	153.6kbit/s	1/4（卷积码/Turbo 码）	QPSK
4		307.2kbit/s	1/2（卷积码/Turbo 码）	QPSK
5		230.4kbit/s	1/4（卷积码/Turbo 码）	QPSK

我们看到，在 IS-95 时只有 RC1 和 RC2 的配置，即只有 9.6kbit/s 和 14.4kbit/s 两种最高速率，到了 CDMA 1X 时，又多了 RC3、RC4、RC5，大家请注意，要达到这个速率，变化的不止有调制方式，还有扩频因子。

（5）空中接口增加了一大把信道，原先的 IS-95 的信道是很简单的，除了导频、同

步、寻呼和业务信道以外，别的啥也没有。到了 CDMA 1X 时，就基本和 WCDMA 差不多了，公共控制、广播控制、快速寻呼信道都出来了。为了不使本书显得过于复杂，就不对这些信道一一详述了，有兴趣的读者可以参考相关书籍。

到这里 CDMA 1X 的内容就基本告一段落了，我们看到，驱动 IS-95 向 CDMA 1X 演进的基本动力源于数据业务的蓬勃发展。为了支持数据业务，CDMA 1X 在核心网侧新增了分组单元，在空中接口，采取了可变扩频因子、新增无线链路配置、可变帧长、新增调制方式、新增物理信道等多种方式来提升数据业务速率，增加数据业务灵活性和反应速度。

CDMA 1X 的最高速率可以达到 307.2kbit/s，这个速率怎么得来的大家也不难算出来。采用的是 RC4 的配置，也即扩频因子为 4，QPSK 调制，1/2 卷积码，由于码片速率为 1.228 8Mchip/s，我们可以得出此种配置下的最高速率为：

$$1\,228.8\ \text{kchip/s}/4(\text{扩频因子})\times 2\text{（QPSK调制）}\times\frac{1}{2}(1/2\text{信道编码})=307.2\text{kbit/s}$$

这种速率相对 GPRS 的峰值速率 171.2kbit/s 已经有压倒性的优势了。但是随着 GPRS 升级到 EDGE，其峰值速率又提高到 473.6kbit/s，CDMA 1X 再度和 EDGE 陷入苦战。不过无论是 CDMA 1X 也好，EDGE 也罢，其理论峰值速率相对互联网而言还相去甚远，能够支持的数据业务也比较有限。更高速率的视频等业务对于这些制式而言还显得非常吃力，因为 CDMA 1X 并没有就此停下脚步，而是继续往 EV-DO 和 EV-DV 演进。

6.4 迈向 3G 时代—　EV-DO 与 EV-DV

我们知道，分组数据和话音是两种性质不同的业务，两者对资源的需求也大大不同。首先分组数据一般是突发的，具有不连续的特点，比如你在上网，一个网页看完了或是没有兴趣再看了就会点击下一个网页，这时候数据流量会有一个突增，而在你看网页的这段时间里，数据流量是很小的；其次，数据业务对时延相对而言没那么敏感，一个网页快两秒或者慢两秒出来对用户的感知差别不是那样大；再次，数据业务的上下行流量一般也是不对称的，下行流量往往远高于上行流量，这个差别大家也很容易感觉出来，我们在网页上看的东西要远多于我们上传的东西；最后，数据业务的 QoS 也是各异的，比如打魔兽世界和看在线电影所希望的服务质量就是完全不同的，一个数据流量需求小，要求反应速度快，没有缓冲，一个数据流量需求大，有点缓冲无所谓。

而话音则完全不一样，它首先是对时延和时延的抖动十分敏感，如果对方说话，我们好一阵才能听到，那感觉就非常别扭，这跟等网页打开时候的等待的心情完全不一样；



其次，话音的上下行流量也是基本对称的，双方说的话经过话音编码之后差别不会特别多；最后，话音的 QoS 要求也是基本一致的，谁打电话都是希望无延迟，话音质量好，没有什么特别的差异化的需求。

两者的要求差别这么大，如果将其放在同一个载波上提供服务，很明显两者会互相影响，协调起来难度较大。而如果将这两种业务分别放在不同的载波上，对两者采取不同的传输和控制方法，则可以大大简化系统设备的结构，简化资源控制方式，使两种业务分别得到很好的服务质量。

在 CDMA 1X 时代，由于数据速率并不是很快，这个问题还不是很明显。现在按照 IMT-2000 的要求，希望大大提高数据速率，那么这个问题就比 2G 时代更为重要了。围绕这个问题，有两种观点，一种观点认为需要用独立载波来承载数据，于是诞生了 EV-DO 技术；另一种观点认为用一个载波纯粹来承载数据会造成资源上的浪费，并不经济划算，他们希望话音和高速数据可以承载在同一个载波上，从而诞生了 EV-DV 技术。

6.4.1　机动车和自行车分道行驶—　EV-DO

我想曾经一定也有这样的问题在困扰着城市管理者，自行车速度慢，机动车速度快，它们两者之间有很大的差别，在同一条道路上不好控制，那么是不是需要对机动车和非机动车分别划分道路，从而达到城市道路的高效利用？事实上，后来很多城市进行了机动车道和非机动车道的划分，将时速 20 千米以下的单车、电动车等都纳入了非机动车道。

这与 EV-DO 诞生之初的背景也颇有点相似。话音业务和高速数据业务其特点差别是很大的，针对这样的情况，人们提出了 cdma2000 1x EV-DO 技术。EV-DO 系统通过采用独立载波提供高速数据业务，其早期的 Rev.0 版本下行链路数据速率最高可达 2.4Mbit/s，反向链路数据速率最高可达 153.6kbit/s。演进到 Rev.A 之后，其下行和上行速率分别可以到 3.1Mbit/s 和 1.8Mbit/s。

应当说 cdma2000 1x EV-DO 现网版本有好几个，一个叫做 Rev.0，这是第一个版本，其下行速率为 2.4Mbit/s，上行速率为 153.6kbit/s，这个版本在现网用的已经很少了；第二个叫 Rev.A，也即现在用的最多的 A 版本，中国电信也在用这个版本，其下行速率为 3.1Mbit/s，上行速率为 1.8Mbit/s；第三个版本叫做 Rev.B，这个版本可以把 3 个载波捆绑起来使用，下行速率和上行速率可以提高 3 倍，可以实现下行 9.3Mbit/s，上行 5.4Mbit/s。中国电信出于对抗中国联通 HSDPA 的需要，计划于 2011 年下半年上 Rev.B 版本，提高上下行速率。

CDMA 1X EV-DO 为了提高数据下载速率，进行了一系列的变革，其上下行速率相对 WCDMA R99 版本都有了一定程度的优势。不过好景不长，这些优点都被 WCDMA 学习吸收，并导致了 WCDMA 的下一个版本 HSDPA 的诞生。EV-DO 不得不重复 CDMA 1X



和 GPRS 缠斗的历史，再次陷入和 HSDPA 进行速率和吞吐能力提升比拼的“军备竞赛”之中。

尽管在 EV-DO 系统里话音和数据分别采用的不同载波，但是有一个特点值得大家注意。那就是 EV-DO 的载波其射频特性和 IS-95 及 CDMA 1X 是完全一样的，包括码片速率、链路预算等，这样的话部署 EV-DO 就不需要重新进行网络规划，而是沿用原来的 CDMA 1X 的布局即可，这一点真可谓是匠心独具。

针对高速分组数据业务的特性，cdma2000 1x EV-DO 系统对 cdma2000 1x 系统做了重大改进。1x EV-DO 在前向链路上采用了多项与 CDMA 1X 差别较大的技术。这些技术后来被 WCDMA 的后续演进版本 HSDPA 广泛学习，1x EV-DO 下行链路的主要特点有以下几个。

（1）采用时分多址方式。

1x EV-DO 系统将码分多址方式改成了时分多址方式。也就是说，在 1x EV-DO 系统中一个时刻只有一个用户在接收服务，不同用户在不同的时刻接受服务。这样，当用户没有数据传输的时刻，就不必给用户分配信道。这与 HSDPA 有着很大的不同，虽然 HSDPA 也采取了时分，但是 HSDPA 同一时刻还是可以有几个用户同时传输数据的，不像 EV-DO 在同一时刻只能接纳一个。

在应对上网业务时，时分多址相对码分多址是有优势的，因为上网业务的特点就是突发、不连贯，可能有时数据量很大，有时候又没有什么数据量。这样的话，码分就不如时分能更充分利用资源。

为了便利地进行资源调度，提高空中接口的数据吞吐率，HSDPA 也采用了时分复用的方式。在 1x EV-DO 里，是 1.667ms 调度一次；而在 HSDPA 中，是 2ms 调度一次。不过在 HSDPA 这 2ms 中，又有 15 个码字可以分配给多个用户，这与 EV-DO 在某个时隙里独占所有资源有所不同。所以说 HSDPA 是时分多址加码分多址，而 EV-DO 仅仅是时分多址。但是，EV-DO 依然采用了扩频和解扩这种 CDMA 的方式，这就保留了原来 CDMA 技术抗多径干扰的特性。

（2）采用动态速率控制。

最初设计 CDMA 1X 的时候，其相对 IS-95 的主要改进都集中在基站与移动台点对点的无线链路上，如无线配置 RC 方式的增加、调制方式的变更等。但是，一个完整的蜂窝移动通信系统包含多个基站和多个用户，是一个典型的多点对多点的无线通信系统。随着无线传输速率的增加，系统的性能越来越不单单取决于单个无线链路的性能。

随着用户逐步远离基站（或者说随着用户无线环境的恶化），用户的信噪比下降，如果此时要保持该用户的下载速率的话，就必须要很好的信噪比，那必然会不断提升功率，从而消耗过多功率资源，也给网络带来很大的干扰。所以，比较合适的做法应该是，对



无线环境较好的用户提供较快速率的数据业务，对无线环境较差的用户适当降低传输速率，从而使系统的平均性能达到最大。如果只考虑单个用户，那当它信道质量变差了就给它提升功率对它而言性能是最优的，因为提升功率可以保持和原来相同的信噪比。但是从整网的角度来看，还是少给它传输点数据对系统比较有利，为了一个信道质量比较差的用户消耗过多的功率资源不划算。

这看起来有点像做生意，对于单个业务员来说，如果所负责的区域市场情况恶化（无线信道质量变差），那么自然是希望公司能够加大投入（提高功率），对于个人而言，这对保持他地区的业务收入（下载速率）有好处。但是对于公司而言，显然不如在市场情况好（无线信道质量好）的地方多投入（提供高的编码速率），在市场差的地方少投入（提供低的编码速率），这样对公司整体收入（系统吞吐率）而言有好处。

由于在 1x EV-DO 里，每个时隙只有 1 个用户在接受业务，此时，基站的全部功率都给这个用户发送信息。所以，1x EV-DO 里在下行链路中不需要再进行功率控制，取而代之的是速率控制。所谓速率控制，就是系统根据不同用户的无线环境情况快速调整编码方式，从而达到改变速率的目的。

在 HSDPA 中，也采用了相似的做法。HSDPA 在下行链路中也不再进行功率控制，而是根据无线环境采用自适应的调制和编码（AMC，Adaptive Modulation and Coding）。无线环境比较好的时候，就采取速率比较高的编码和高阶的调制（比如 16QAM），可以传输更多的数据；而无线环境比较差的时候，就采取速率比较低的编码和低阶的调制（比如 QPSK），传输更低的数据量可以保证出更少的差错。

（3）采用灵活的调度算法。

我们上面说了，由于每个时隙中只有一个用户在接受服务，显然，为了提高系统的整体性能，系统应该优先向无线环境比较好的用户提供服务，从而获得最大的吞吐量。但是这样一来，无线环境环境比较差的用户可能长时间得不到服务，对于一个付费用户，这显然是很不公平也是很难以接受的。

为了解决这个问题，1x EV-DO 系统里引入了“调度”的概念。所谓“调度”，在 EV-DO 里指的是下一个时隙应该把资源给“哪个”用户，而在 HSDPA 中指的是下一时隙应该把资源给“哪些”用户。为了兼顾效率和公平，采用了多种调度算法，其中一种叫做“正比公平算法”，这也是 HSDPA 中普遍应用的一种算法。这种算法有点像学校里老师对待学生的方式，也就是“激励先进，提携后进”，老师一般对成绩好的学生关注比较多，激励学生取得更好的分数；老师对成绩比较差的学生关注也比较多，如果他们离平均分数比较远，就要多加辅导，以期取得更好的成绩。

在 EV-DO 中，如果某个用户的信道质量比较好，给它分配的传输速率也会比较高；如果某个用户的信道质量很差，长期得不到调度，远落后于平均水平，其优先级也会得

到提高，会得到更多的调度机会，以满足“公平”的需要。

大家在这里应该注意“自适应调制编码 AMC”与“调度”的概念区别。调度的作用，是决定下一时隙的资源“由谁来使用”，用户有这么多，既要考虑效率的因素，自然是希望信道质量好的用户能被多分配几次，但是又要考虑公平的因素，不能让信道质量差的用户长期得不到照顾。“效率与公平”的兼顾，永远不是一件容易的事情。而自适应调制编码的作用，是给“已经被调度”的用户分配资源，如果信道质量好，就分配高阶的调制高速的编码；如果信道质量差，就分配低阶的调制低速的编码。

（4）采用快速小区交换。

我们知道，传统的 CDMA 网络中，如 IS-95、CDMA 1X、WCDMA 都是采用软切换的。所谓软切换，指的是一个手机同时与多个基站相连和交换数据，这样就不容易出现掉话，但软切换的好处是以占用更多空中接口的资源为代价的。

到了 EV-DO 时代，显而易见是没有办法再进行软切换的。因为一个用户就需要占用某个时隙里的所有资源，如果进行软切换，那么和这个手机相连的其他基站的载波也需要把整个载波的资源都给这个用户，这显然是不可能的。由于 HSDPA 和 EV-DO 采用的是相似的机制，所以在 EV-DO 和 HSDPA 中，都没有采用软切换。

如果手机用户需要从一个基站的覆盖区域转移到另一个基站的覆盖区域，那么他正在进行的上网业务该怎么办呢？

在 HSDPA 中，会对上网业务进行硬切换，就像 GPRS 一样。而 EV-DO 会提前通知目标小区进行数据准备，从而没有因为切换导致的数据中断，也称为快速小区交换。

（5）采用混合 ARQ 技术。

由于数据速率很快，一旦出现什么错误，再由 RNC 来重发就显得有些来不及。所以在 EV-DO 和 HSDPA 中，一般都采用 Node B 来重传数据。这个也叫做快速重传，可以降低空中接口由于重传带来的时延。

除了关键技术以外，我们不妨对 1x EV-DO 和 HSDPA 的一些关键性能也进行一下对比，好加深对它们的认识。

首先是频谱效率，所谓频谱效率，指的是单位频谱能够支持的峰值下载速率，可以体现频谱资源利用效率的高低。EV-DO 采用了 1.25MHz 带宽，其下载峰值速率为 3.1Mbit/s，我们不难算出其频谱效率为 3.1Mbit/s/1.25MHz = 2.48bit/Hz。而 HSDPA 在 5MHz 带宽上的表现又如何呢，HSDPA 其峰值速率为 14.4Mbit/s，那么有 14.4Mbit/s/1.25MHz = 2.88bit/Hz。相比 EV-DO 要略微高出那么一点点，但并没有我们起初认为的那么大，很多人可能因为 14.4Mbit/s 和 3.1Mbit/s 相差太大就直观地认为两者频谱效率差距很大，其实造成这个速率差距的原因主要是 EV-DO 占用的带宽比较少。所以到了 Rev.B 版本之后，EV-DO 把 3 个载波捆绑起来使用，这样其频谱带宽就可以达到 $1.25 \times 3 = 3.75$MHz，与 WCDMA 的



5MHz 差距小了不少，而其峰值速率可以达到 3.1Mbit/s × 3 = 9.3Mbit/s，这样看起来是不是和 14.4Mbit/s 差别就小了很多了呢？

其次是承载方式，1x EV-DO 业务必须使用独立的载频承载，不能与 1x 共享载频，这样资源控制比较简单，但容量低时，容易造成资源浪费。而 HSPA 业务既可以与 R99 业务共享同一载频，也可以使用独立的载频承载。共享载频时，新增加的物理信道需要占用额外的功率和码资源，会导致 R99 网络下行覆盖和容量下降，同时提升了上行干扰余量门限，增加了小区间和小区内的干扰，会导致 R99 网络上行覆盖和容量下降。从这一点上来看，HSDPA 更像 EV-DV。

介绍完了 EV-DO，我们不妨来看看 EV-DV。虽然 EV-DO 是现网的主流应用，但是一种技术的出现必有其应用的背景，之所以会出现 EV-DV，一定是因为它能给运营商带来一些特别的价值，我们可以看看价值都体现在哪些方面。

6.4.2　机动车与非机动车混合行驶—　EV-DV

EV-DV 有点像机动车和非机动车的混合行驶，不过不必担心。电信系统是一个周密的、统一的系统，不像路上的行车是独立的、难以统一控制的个体。所以话音和数据业务可以通过有效的方式来控制使其不产生冲突，即使话音和数据之间产生冲突从而影响了某一方面的性能，其后果也比马路上出了问题来的小得多。

CDMA 1X EV-DO 系统由于引入了很多新的技术而需要使用独立载波，尽管这样做对资源的控制相对简单，话音业务和高速分组数据业务之间没有影响，但这还是会给运营商带来不便。而且由于话音和数据业务使用不同的载波，数据用户无法利用话音用户处于静默期间空闲出来的系统资源（如发射功率）；当分组数据量不是很高的时候，DO 载波的利用就会不够充分，从而可能降低资源的整体使用率，使用率下降了，从经济效益的角度来看肯定不划算。

面对这种情况，如何在一个提供话音业务的载波上同时提供传输高速分组数据业务的能力就成为了需要研究的问题，这就是 1X EV-DV 技术的由来。我们从字面上很容易看出来，DV 即 Data&Voice，意思是系统可同时支持高速分组数据业务和实时业务，在同一载波上传输实时、非实时和混合业务。

3GPP2 组织从 2000 年开始就收到了来自各个设备制造商关于 EV-DV 的提案，经过评估和融合，最终 3GPP2 在 2002 年 5 月通过了 EV-DV 规范，此规范是在 IMT-2000 的基础上，增加支持高速的下行分组数据信道的内容，版本定为 Rev.C，其有关上行链路的规范也于 2004 年 3 月由 3GPP2 制定完成，版本定为 Rev.D，这个过程看起来有点眼熟，是不是很像 HSDPA 和 HSUPA 诞生的先后顺序。

CDMA 1X EV-DV 系统中，下行链路最高速率可达 3.1Mbit/s，上行链路最高速率可

达 1.8Mbit/s，这与 EV-DO 的速率相同。除此之外，EV-DV 单载波支持的话音容量与 1X 相比也有所增加。

前面讨论过，话音业务和数据业务是两种完全不同性质的业务。话音业务是低速率、低带宽要求，时延要求较高的业务。对于话音业务，CDMA 系统采取保留功率控制的方法来分配资源。为了保证和 CDMA 1X 兼容，功率控制的方式必须得以保留。对于数据业务，EV-DV 也采取速率控制和调度的方法来调配资源。实际上，EV-DV 也就是把 1X 和 EV-DO 的方式混合在一起，其实某种程度上说 EV-DV 跟 HSDPA 很像。

概括地说来，EV-DV 没有改变 1X 的传统的信道，传统的话音和低速数据都是走它们已有的信道，它是通过新增可以时分共享的高速信道来支持高速数据用户，这些高速数据业务不再采用功率控制，而是采用速率控制，这与 HSDPA 极为相似。

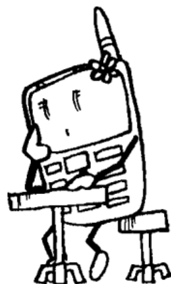
CDMA 1X EV-DV 的这种工作方式与现有的 1X 系统的兼容性好，应用灵活，容易平滑过渡；同时又充分挖掘了无线资源的潜力，提高了数据传输速率。

到这里，CDMA 的部分就介绍完了。我们看到，CDMA 在创始之初，也就是 IS-95 的时候，并没有考虑到数据业务的需求，由于话音对宽带的需求基本固定，所以采用了对码资源“均匀切蛋糕”进行分配的方式，信道也简单，就那么几条；到了 CDMA 1X 时代，为了支持数据业务，增加了分组域的核心网，同时增加了若干信道；CDMA 1X 虽然能够支持数据业务，但其峰值速率太低，不能支持高速数据业务，为了提供高速率的数据业务，采用了 EV-DO 和 EV-DV 两种演进路线，两种路线其所采用的技术手段比较类似，都是通过自适应调制和编码、混合 ARQ、对高速数据业务不采取功控等方式来实现的，区别在于 EV-DO 采用的是单独载波，而 EV-DV 话音和数据都在一个载波上实现。

在 2G 到 3G 这一段过程中，高通一直在坚持自己的独立演进路线，从 IS-95 到 CDMA 1X，从 CDMA 1X 到 EV-DO、EV-DV。而在 3G 的后续长期演进中，高通放弃了自己的演进路径——UMB，而是转向了 LTE，可见 LTE 已成为大势所趋，接下来我们就来了解了解 LTE，看看它与 3G 都有哪些区别，相对 3G 都有哪些性能提升。

第 7 章

Chapter 7



LTE 网络— 更扁平，更高效

当基于 ADSL 的宽带出来之后，曾经也有人对此不屑一顾，56kbit/s 的拨号上网不是够了吗？上网的需求不就是看两个没有图片的文字新闻，发几个 E-mail 么，那么大的带宽用来做什么吗？然而，宽带和互联网的发展迅速击溃了这种质疑，当今 4Mbit/s 的宽带已经成为主流，电信和联通都在开始推广 20Mbit/s 的宽带了，回顾中国 10 年前互联网的状况，真可谓沧海桑田。当时用 56kbit/s 的猫在互联网上的速度用蜗牛来打比方绝不夸张，碰到有图片的网页还需要点击“停止”键，否则整个网页要很久之后才能出得来，经历过当年互联网状况的人，可曾展望过今天？

有线宽带的革命也会发生在无线上，3G 虽然曾经备受质疑，但是随着以 iPhone 和 Android 为代表的智能机成为主流，数据业务必将取代话音成为未来网络的发展重心，这一点已经成为共识，2011 年 1 季度 NTT 和 KDDI 的数据业务 ARPU 值超越了话音便是明证。

视频点播、电视直播等高流量的业务发展，预示着无线网络必须在下行峰值速率和小区吞吐量方面有所突破；而越来越多的人开始通过无线网络参与互动类对战网络游戏，这意味着我们需要一张扁平的网络，减少层级，减少时延，提高反应速度。

没错，这两方面都是 UMTS 网络的长期演进——LTE（Long Term Evolution）网络所关注的。对于 3GPP 组织而言，这也基本属于共识，问题在于，UMTS 网络刚刚部署不久，应该采用怎样的方式来达到要求，又采用怎样的节奏来推动网络向前演进呢？

7.1 LTE 动力— 跟 WiMAX 争武林盟主

3G 技术无疑是当今移动通信的主流技术，而在 3G 的 3 大标准之中，又以 3GPP 制定的 WCDMA 标准最具竞争力和影响力，占据了很大一块 3G 的份额。2004 年那会，当 3G 系统在全世界逐步部署的时候，增强型的 UMTS 技术——高速下行分组接入（HSDPA）和

高速上行分组接入（HSUPA）的标准化工作也已经基本完成。对于未来，3GPP 的主要成员公司也是早有打算，它们在做精心的准备，预计于 2008 年左右启动 IMT-Advanced（International Mobile Telecommunication-Advanced，先进国际移动通信）技术的标准制定。IMT-Advanced 技术也就是俗称的 B3G（Beyond 3G，超 3G）技术或者 4G 技术。当时踌躇满志的 3GPP 的一干众兄弟都在唾沫横飞地讨论 3G 的大好形势和 4G 的美好前景，当此之时，谁曾想到这 3G 和 4G 之间还会硬插进来个 LTE。我们不禁要问，这 LTE 是怎么来的呢？

天有不测风云，在 3GPP 过着烈火烹油、鲜花似锦的日子的时候，斜刺里杀出来个搅局者——WiMAX（World interoperability for Microwave Access，全球微波互联接入）。虽然 WiMAX 的名字取得生硬拗口，也没有挂个什么“Communication”的头衔，看起来不像是来挑战 3GPP 的江湖地位的，但是这个不速之客还是着着实实让 3GPP 吃了一惊。3GPP 如此重视 WiMAX 是有道理的，因为 WiMAX 其背后的力量实在不容小觑——WiMAX 是由 IEEE 组织开发的标准，这个组织的名声不用说大家也知道。WiMAX 势力的盟主也绝非泛泛之辈——正是大名鼎鼎的 Intel！加盟阵容也可谓豪华，在芯片领域，有 Intel 和 TI 执其牛耳；在设备领域，阿尔卡特朗讯、北电、NEC、西门子依次排开；在运营领域的阵容也蔚为壮观，AT&T、BT、France Telecom、Sprint、Telefonica、KDDI 都是赫赫有名的运营商。

Intel 曾是 Wi-Fi 的坚定支持者和主推者，现在它又开始力推 WiMAX，既然 Wi-Fi 能如此成功，那么 WiMAX 的成功似乎也是顺理成章的事情。WiMAX 其初衷在于“宽带的无线化”，IEEE 希望为用户提供高速的、广覆盖的宽带无线接入，从这一点上而言，WiMAX 可以理解为 Wi-Fi 的广覆盖版，Wi-Fi 虽然很成功，但是其覆盖范围毕竟太有限了，而且用的是不需要授权的频段，不需要授权频段的特点就是方便，谁都可以拿来用，因此用得一多，干扰也就不可避免，这两个缺陷使得 Wi-Fi 注定只能去覆盖一些热点。而 WiMAX 可以实现对一个城市的广覆盖，这种定位就使得它不可避免地要和 3GPP 的 UMTS 及其增强型演进的标准来抢饭碗。抢饭碗就抢饭碗吧，开打靠的是实力，WiMAX 各项性能指标怎么样呢？我们不妨和 HSDPA 进行一下对比，如表 7-1 所示。

表 7-1　　WiMAX 与 HSDPA 性能比较

	WiMAX	HSDPA
频率范围	16d：2～11GHz	上行：1 920～1 980MHz
	16e：≤6GHz	下行：2 110～2 170MHz
信道带宽	16d：1.25～20 MHz	5 MHz
	16e：1.25～20 MHz	
应用地域	16d：主要在北美和欧洲	起源：日本
	16e：起初在韩国	发展：欧洲、美国和韩国



续表

	WiMAX	HSDPA
基本业务	16d：固定宽带无线接入，点对点中继	高速移动数据
	16e：移动宽带无线接入	
最大吞吐量	16d：75 Mbit/s(20MHz 带宽下)	14.4 Mbit/s(5MHz 带宽下)
	16e：30 Mbit/s(10MHz 带宽下)	

在这里，我们首先要区分一下 WiMAX 的两种主流标准，IEEE 802.16d 和 IEEE 802.16e，其中 802.16d 主要针对固定接收，也就是插个 WiMAX 网卡坐在星巴克边喝咖啡边上网的场景；而 802.16e 增加了移动性，这就和 3GPP 发生了正面冲突。我们可以从表 7-1 中看出，IEEE 802.16e 在相等的带宽内下行峰值速率相对 HSDPA 并没有多大的优势，但是架不住人家带宽高啊，在 10MHz 频谱的带宽内，WiMAX 能做到 30Mbit/s。除此之外，WiMAX 还支持动态带宽，可以在 1.25～20 MHz 进行选择。对于有些带宽资源不那么富裕的国家，比如说美国，能动态调节带宽显然很有吸引力。

3GPP 开始坐不住了，无论是 WiMAX 论坛还是 WiMAX 技术本身的性能指标，都让 3GPP 感到了一种潜在的威胁，如果 WiMAX 也像 Wi-Fi 一样遍地开花。那么 HSDPA 显然会受到不小的挑战，形势非常严峻。想这些年来 3GPP 及其之前的标准化组织在无线通信领域里从来都是纵横天下无敌手，WCDMA 以及其前身 GSM 一直牢牢霸占着手机通信这一块最大的份额，这武林盟主之位，岂能轻易让人！

在这种局面下，3GPP 旗下的通信厂商不得不团结起来快速跟进，为了使 3GPP 相对其他标准保持长期的优势，它们在 HSDPA 和 IMT-Advanced 之间横插进去一个标准，也即 LTE，并不遗余力地投入了 LTE 的标准化工作。

为了能和可以支持 20MHz 的 WiMAX 技术相抗衡，LTE 也必须将最大系统带宽从 5MHz 扩展到 20MHz。为此，3GPP 不得不放弃长期采用的 CDMA 技术（CDMA 技术在实现 5MHz 以上大带宽时复杂度过高），而是采用了新的核心复用技术，即 OFDM 技术，这跟 WiMAX 采用了相同的方式。选取 OFDM 而放弃 CDMA 还有一个原因，就是因为高通在 CDMA 上收取的专利费用过于高昂，厂家希望有更便宜的技术。

同时，为了在 RAN 侧降低用户面的延时，LTE 取消了一个重要的网元——无线网络控制器 RNC，从模拟系统到 2G、3G 一直都扮演着重要角色的基站控制器就此退出了历史舞台。另外，在整体系统架构方面，核心网侧也在同步演进，推出了崭新的演进型分组系统（EPS，Evolved Packet System），这称之为系统框架演进（SAE，System Architecture Evolution）。无线网和核心网都有这样大的动作，这使得 LTE 不可避免地丧失了大部分与 3G 系统的后向兼容性。

自 2004 年 11 月启动 LTE 项目以来，3GPP 以频繁的会议全力推动 LTE 的研究工作，仅半年时间就完成了需求的制定，可谓进展神速。在 2006 年 9 月完成了研究阶段（SI，Study Item）的工作，2008 年底基本完成工作阶段（WI，Work Item），从 2009 年开始，已经陆续有一些运营商开始进行试商用。

7.2 LTE 方向一　移动通信的宽带化

应当说无论有没有 WiMAX，移动通信标准都会走向今天的模样，也即"宽带化"、"数据化"、"分组化"。区别只是在于，WiMAX 的出现大大加速了这一进程，并导致了横亘在 HSDPA 和 IMT-Advanced 之间的 LTE 的出现。LTE 的本质和方向性的变革，还在于移动通信与宽带无线接入（BWA，Broadband Wireless Access）技术的融合。

宽带无线接入技术早期定位于有线宽带技术（如 ADSL）的延伸，目的就是希望能够摆脱网线的束缚，实现自由自在的无线上网。最早实现这一目标的是 IEEE 802.11x，也就是我们俗称的 Wi-Fi。试想一下，假如没有 Wi-Fi，你在星巴克上网的时候便会出现下面这样的场景，你微笑着跟服务员说："请帮我牵根网线，要结实一点，你看这里人来人往，不要随便就被踩断，也不能太结实，免得成了绊马索"。试想随着人的增多，星巴克里牵着密密麻麻的网线，如同蜘蛛网一样，走路都要小心翼翼，多煞风景，哪里还优雅得起来。正因为如此，Wi-Fi 一推出，即大受欢迎，现在的多数笔记本电脑和智能手机都含有 Wi-Fi 模块，其规模不可谓不大，应用不可谓不广泛。

然而 Wi-Fi 的缺点也是明显的，那就是覆盖距离太短，于是就推出了 WiMAX 的固定版，IEEE 802.16d，可以实现最大 50 千米的超远覆盖。在此基础上发展的 IEEE 802.16e 加入了寻呼和漫游等功能，体现了明显的"宽带接入移动化"的特点。这是信息技术（IT，Information Technology）产业向通信技术（CT，Communication Technology）产业的一次渗透，实际上，ICT 技术的融合也是近年来非常热门的话题。

与此同时，移动通信技术也在向提供更高的数据速率而努力前行，3GPP 和 3GPP2 组织分别向 HSPA 和 EV-DV 方向演进，这标志着 3GPP 和 3GPP2 在坚持蜂窝通信标准移动性的同时，也在日益重视低速行走、局部场景下的高速下载能力。这实际上也可以理解为 CT 向 IT 的一次渗透，通信产业从传统的话音业务在不断向宽带数据业务进行拓展。

传统的通信产业和传统的 IT 产业不约而同地注意到了它们之间交汇点的巨大潜力——移动互联网（Mobile Internet）正在兴起，人们希望可以随时随地接入因特网，浏览新闻，观看视频，并通过微博随时分享他们的所见所闻（如图 7.1 所示）。移动互联网



用户的增长是如此迅速，以至于摩根斯坦利在它的一份著名的报告“Internet Trends Outline”中用了史无前例一词来形容移动互联网发展的迅速。

而移动互联网的接入技术是可以多元化的，你可以通过 HSDPA 来上互联网，也可以通过 Wi-Fi、WiMAX 或者是 EV-DO、LTE。只要你能满足无线宽带对于速率和延时等性能指标的要求，那么采用何种技术接入对于用户而言并不是那么关心。由于 IEEE 和 3GPP、3GPP2 从不同的方向朝着同一市场渗透，这也使得 IT 和 CT 在无线宽带领域的技术的界线变得越来越模糊，呈现出融合的趋势。

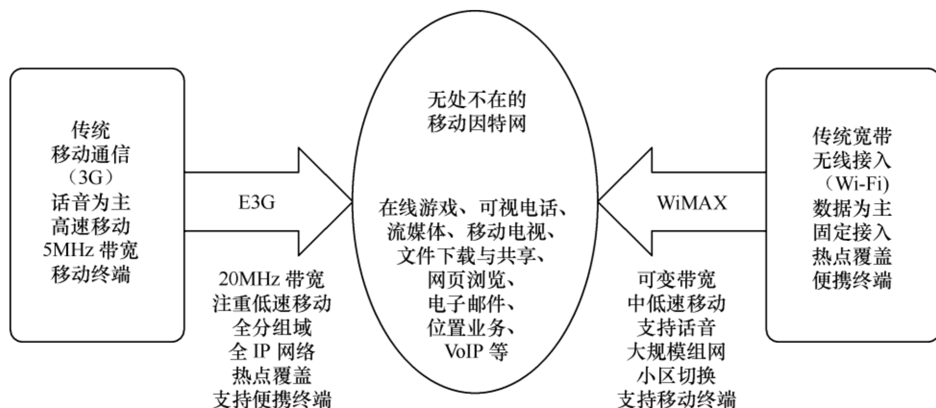


图 7.1　移动通信和宽带无线接入的融合

“宽带接入移动化”的趋势表现为：由大带宽向可变带宽（在有的国家频谱资源比较紧张，为了部署方便，WiMAX 可以支持小带宽）；由固定接入向支持中低速移动演变，由孤立热点覆盖向支持切换的多小区组网演变（从 802.16d 向 802.16e 的演变趋势正是如此）；由支持数据业务向同时支持话音业务演变；由支持以笔记本电脑为代表的便携终端，向同时支持以手机的移动终端演变。业务话音化、覆盖广域化、网络移动化、终端手机化，IEEE 剑指何方，不言而喻。

而“移动通信宽带化”又表现为：由 5MHz 以下带宽向 20MHz 以上带宽演变（根据香农定理，没有更高的带宽就无法提供更高的速率，所以从 2G 到 3G 再到 LTE 其带宽都在不断提升）；由注重高速移动向低速移动优化演变；由电路交换、分组交换并行向全分组域演变（无论是 3GPP 还是 3GPP2 都意识到了 IP 网络的迅猛发展，都在标准里增加了支持 IP 的选项）；终端形态由以移动终端为主向便携、移动终端并重演变（大家可以看到数据卡的发货量是越来越大）。

正是因为对移动通信未来必然宽带化的共识和应对 WiMAX 挑战的需要，3GPP 从 2005 年开始就将绝大部分力量投入了 LTE 的研发。但这样的决策并非没有争议，因为 LTE 相对 UMTS 而言变化太大，根本就是一次革命性的改变，而非 LTE（Long Term Evolution）字面上

来得那么平滑。为了保护在 UMTS 上的既有投资，也为了已有的 UMTS 网络相对 WiMAX 而言能够保持足够的竞争力，从 2006 年年初开始，又启动了 HSPA 演进（又称为 HSPA +）的工作，到目前为止，HSPA + 已经能够提供接近 WiMAX 和 LTE 的无线宽带接入能力。

7.3 先有的，后放矢— LTE 需求

开公司，要先定战略，所谓战略，就是回答公司未来要往何处去。起草通信标准，首先要解决目标问题，技术细节敲定之前，先要对这个系统要达到的要求做一个整体的概述。我们都知道，目标越清晰，实现的可能性也就越大。3GPP 会对 LTE 有一个整体的目标，然后向各个成员征集方案，所以这个目标往往也称作需求。我们就来看看 LTE 的需求都是什么，在这里，我们只挑选在本书将展开论述的最重要的几条。

（1）显著提高峰值数据率，达到上行 50Mbit/s，下行 100Mbit/s。我们知道，LTE 追求的是“无线的宽带化”，想象一下，对于宽带而言，100Mbit/s，还是共享的，就相当于一个网吧的带宽只有 100Mbit/s，这个要求高吗？当然，对于无线通信，这很不容易，相比有线通信而言，付出的代价要大得多。

（2）显著提高频谱效率，达到 3GPP R6 的 2～4 倍。速率在不断地提升，如果所需要的频谱带宽也随之同比例地提升，那就太不划算了。频谱是无线通信中最宝贵的资源，提高频谱资源效率，是通信中永恒的命题。

（3）尽可能将无线接入网的环回延时降低到 10ms 以内。现在我们是要做“无线宽带”，那么宽带要不要玩魔兽世界呢，宽带要不要玩反恐精英呢？对于每一个玩过对战类游戏的人而言，都知道延时高是一件多么痛苦的事情。

（4）可扩展带宽，需要支持 1.4MHz、3.0MHz、5MHz、10MHz、15MHz、20MHz 等系统带宽。我们可以看到，WiMAX 和 LTE 都不约而同地提出了希望支持可变带宽，而且希望能够支持 5MHz 以下的小带宽。这是因为全球的频谱资源都很紧张，有些国家或者运营商可能拿不出 20MHz 这样完整的一块频谱资源出来用于 LTE，那么让它们在更少的频谱带宽下也能运营 LTE 相当重要，能促进 LTE 在全球的开花结果。

下面我们就来看看 LTE 是如何实现以上目标的。

7.4 绕开高通的壁垒— LTE 关键技术之 OFDM

我们知道，无线宽带接入有多种技术，这些不同的技术标准可能都有不同的性能指



标，但是一定有一条是最关键的，那就是下载速率。这一点在固定宽带里都不例外，大家去电信联通的营业厅都可以看到，2Mbit/s、4Mbit/s、8Mbit/s、20Mbit/s 的宽带都有不同的价格，其差别在哪，无非就是带宽，卖的就是上网的速率。

下载速率要提升其关键点在哪里呢？在这里我们不妨又把香农公式翻出来，信噪比 S/N 能提升的空间总是很小的。要想提升宽带的容量 C（也即下载速率），其关键还是在于 B，即有多少频谱资源。为了提升上行下载速率，从 GSM 到 WCDMA 之时，带宽已经由 200kHz 拓宽到了 5MHz。这次从 WCDMA 到 LTE，也不能免俗，带宽最大值由 5MHz 提升到了 20MHz（之所以提最大值，是因为 LTE 还支持小带宽，比如 1.4Mbit/s 之类，我们在后面会提到）。

频谱带宽提到了 20Mbit/s，也带来了新的问题，那就是在这么高的带宽下 CDMA 技术实现起来非常复杂，必须寻找新的多址技术。这一点虽然会带来不少麻烦，但是 3GPP 的成员们还是比较愿意接受的，因为如此一来也可以绕开高通在 CDMA 上的专利了，可以少交不少专利费，可谓失之东隅，收之桑榆。

至于新的多址技术，也有 WiMAX 在前面铺路搭桥了，省了不少事情，这种新的多址技术就是 OFDM（Orthogonal Frequency Division Multiplexing，正交频分复用）技术。

其实，OFDM 并不是如今发展起来的新技术，OFDM 技术的应用已有近 40 年的历史，主要用于军用的无线高频通信系统。但是，OFDM 系统的结构非常复杂，从而限制了其进一步推广。直到 20 世纪 70 年代，人们采用离散傅里叶变换来实现多个载波的调制，从而简化了系统结构，使得 OFDM 技术更趋于实用化。20 世纪 80 年代，人们研究如何将 OFDM 技术应用于高速 MODEM。进入 90 年代以来，OFDM 技术的研究深入到无线调频信道上的宽带数据传输。目前 OFDM 技术已经被广泛应用于广播式的音频、视频领域和民用通信系统，主要的应用包括：非对称的数字用户环路（ADSL）、ETSI 标准的数字音频广播（DAB）、数字视频广播（DVB）、高清晰度电视（HDTV）、无线局域网（WLAN）等。

在正式介绍 OFDM 之前，必须先强调一下它的重要性。OFDM 之于 LTE 和 IMT-Advanced，就像 CDMA 之于 3G 的 3 大标准，都是最根本、最核心的东西。不理解码分多址，就很难读懂 3G，而不了解 OFDM，想搞清楚 LTE 也是件困难的事情。所以，希望读者在这一部分多花点时间，后面才会更顺畅一点。

在介绍 TD-SCDMA 的时候，我们把这个词拆成了“TD”、“S”、“CDMA”这 3 部分，分别阐述了这 3 部分的来历。其实对于 OFDM 而言，我们也可以采取相同的办法，因为 OFDM 也是由两部分组成的，即“O”和“FDM”。回想一下“WCDMA”、“cdma2000”，字母和数字之间都蕴涵有某种意思在里面，看来通信标准的取名都不是那么随便的。

7.4.1 这该死的码间串扰— 谈谈 OFDM 中的“FDM”

我们知道，在移动通信中有种现象叫做多径效应。所谓多径效应，指的是手机处于建筑群与障碍物之间，其接收信号的强度，将由各直射波和反射波叠加合成。信号发射之后，由不同的路径到达手机，然后会对信号造成一定的影响，这个就叫做多径效应。

多径传播与视距传播有什么差别呢？差别就在于多径传播这多条信号到达终端的距离长短不一样，因此到达的时间也会不一样，会有一个时间差。（大家看看图 7.2，显然路径 1 和路径 2 的距离不一样）

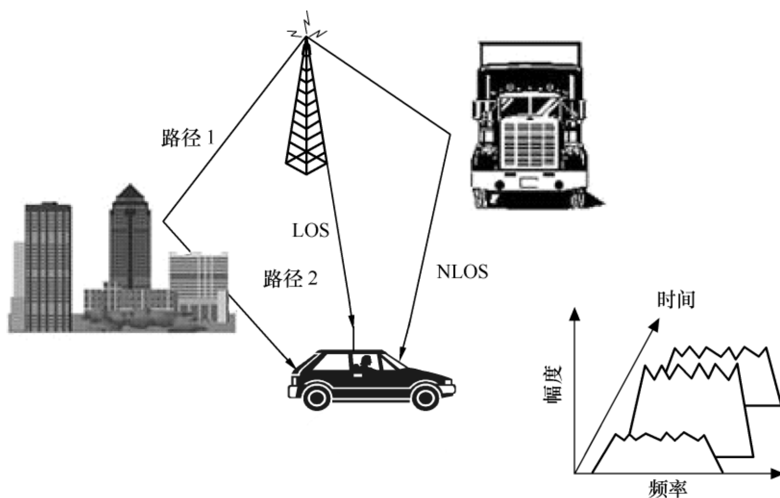


图 7.2 多径效应

这个因多径效应造成的时间差会带来一件很麻烦的事情，即所谓的码间干扰（ISI，Inter Symbol Interference）。所谓码元，指的是一段有一定幅度或相位的载波，是数字信号的载体，有时候，也叫它码片。我们以 QPSK 调制方式为例，来看看什么叫码元，什么又叫做码元周期，码元周期的时间长短会带来什么问题。

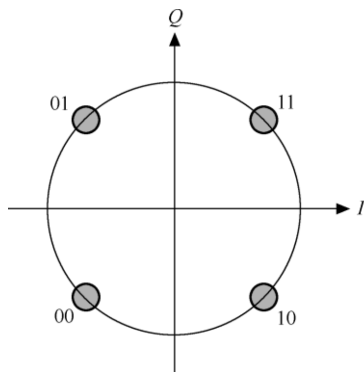


图 7.3 QPSK 调制

我们从图 7.3 中可以看到，QPSK 调制实质上就是幅度不变，通过相位的变化来映射不同的比特数据。比如 11 映射到 $\pi/4$ 相位，01 映射到 $3\pi/4$ 相位，00 映射到 $5\pi/4$，10 映射到 $7\pi/4$。如果我们用一段余弦波来表示调制后的结果，那么就如图 7.4 所示。我们可以



对图 7.4 进行解调，它的码元是（3π/4，5π/4，7π/4，π/4，3π/4，5π/4，7π/4，π/4），用图 7.3 的方式进行解调得出的比特流就是（01,00,10,11,01,00,10,11），我们可以看到，调制其本质就是一个映射。

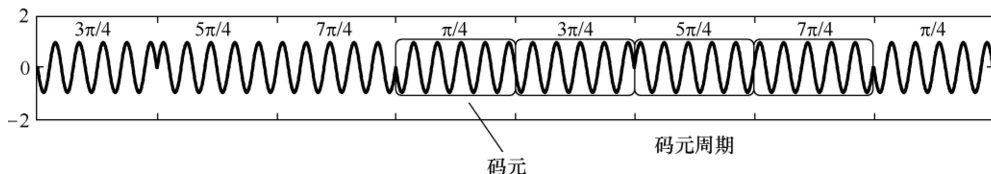


图 7.4　QPSK 中的码元与码元周期

图 7.4 中的每一个方框中的那一段余弦波就代表了一个**码元**，而一个码元的长度就是**码元周期**。对于 QPSK 而言，它只有 π/4、3π/4、5π/4、7π/4 四种变化方式，因此也就只有 4 种类型的码元，在图 7.4 中均有体现。为了简单起见，接下来我们都用⬭来指代码元，毕竟余弦波画起来要更困难。

解释清楚了码元的概念，接下来我们可以看看在一个存在多径传播的无线环境中，码元周期的长短会带来什么影响。

信号在通过多条路径到达接收端后，前一个码元的后端部分会干扰后一个码元的前端部分，这种干扰被称为码间串扰，如图 7.5 所示。

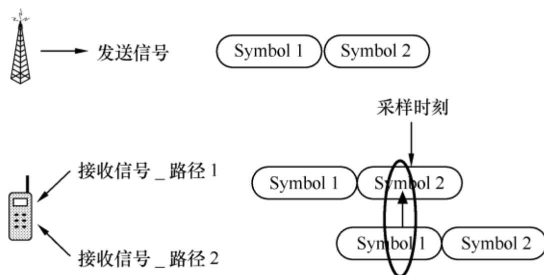


图 7.5　码间串扰

由于路径 2 的时延比路径 1 的要大，因此由路径 2 接收的码元 1 对路径 1 传播的码元 2 造成了干扰，这就是码间串扰的由来，码间串扰很可能造成采样判决出错。

虽然码间串扰可能造成采样判决出错，但是码元时间的长短与此又有什么关系呢。我们不妨来看看图 7.6。不妨假设图 7.6 中最上方的码元周期为 1，那么中间的图码元周期就为 2，最下方的码元周期就为 3。假设 3 张小图传播路径不变，都是从图中的基站到汽车，由于电磁波在空中的速率是既定的，那么传输时延也就是一定的。也就是说，这 3 张图唯一的差别就是码元周期不同。

我们看到，图 7.6 中，最上面的图码元周期最短，被干扰得也最厉害，采样判决很可能出错；中间的图的码元虽然也受干扰，但由于被干扰的部分离采样时刻还有一段时间，所以采样时刻采得的数据一般不会出错；最下面的图其干扰部分离采样时间最远，所以采样得来的数据出错的概率最小。



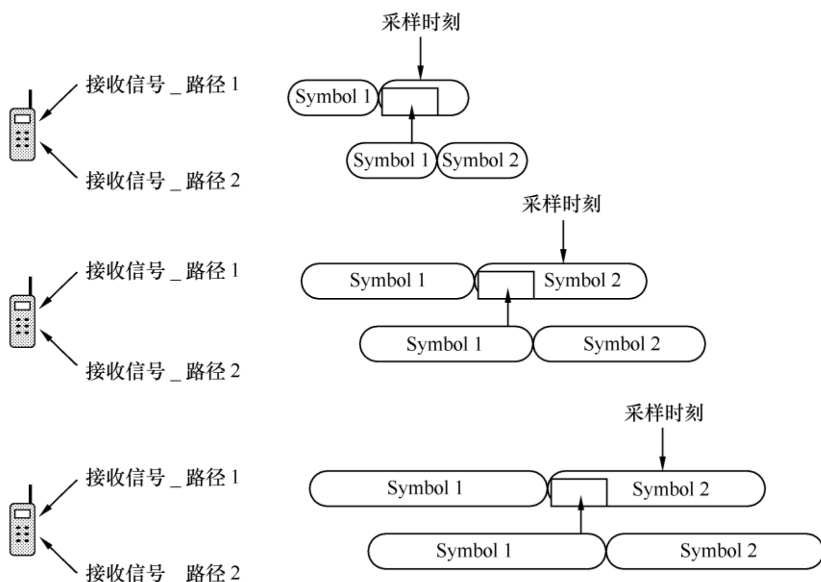


图 7.6　不同码元周期受到的多径干扰的影响

这就是 LTE 的痛苦之所在了，在相等的带宽、相同的调制方式下，想要传输更多的数据，就需要更高的码片速率，也即更短的码元周期。打个比方，现在有 20Mbit/s 的带宽，假如码片速率为 5Mchip/s，调制方式为 QPSK，那么传输速率就为 5Mchip/s × 2 = 10Mbit/s，而码元周期就为 $\frac{1}{5}$M = 0.2μs，如果现在把码片速率提升至 10Mchip/s，那么在同样为 QPSK 的调制方式下，其传输速率可以达到 10Mchip/s × 2 = 20Mbit/s，与此同时其码元周期就为 $\frac{1}{10}$M = 0.1μs。为了更高的速率其码元周期只有原来的一半了，这样的变化会带来怎样的影响图 7.6 中展示得已经很清楚了。在带宽和调制方式不变化的情况下，越高速率就会带来越低的码元周期、越严重的码间串扰，这显然不是我们想看到的。

速率上不去，3GPP 要被成员批评，因为 WiMAX 的威胁近在眼前，谁也不愿意将无线宽带的大好河山拱手让给 IEEE；速率上去了，码间串扰干扰得一塌糊涂，比上不去还糟糕。3GPP 可谓两难啊，怎样解决这个问题呢？

相传 3GPP 的几位专家对此也一筹莫展，郁闷之余，就开始阅读一些中国的古典名著聊以休息，也试图从东方的智慧中寻找若干启迪，这次他们看的著作叫做《三国演义》。三国演义中有一个著名的人物叫诸葛亮，此人上知天文，下晓地理，奇门遁甲，无一不通，相貌仪表也非常不俗，只可惜寿命短了点，未能完成统一大业就先走了一步。专家们经过研究，觉得诸葛亮未能长寿的主要原因是太能干了，同样的条件下完成的活是人家的 3 倍（速率是普通人的 3 倍），也就是说干同样一件事情只需要人家 1/3 的时间（码



元周期只有普通人的 1/3)，这种高强度的工作损害了他的健康（码间串扰太严重了），以至于留下了千古遗憾。

面对诸葛亮的这种情况，几位专家除了唏嘘长叹之外也没有想出什么好的主意，直到他们有一天突然看到了一句话："3 个臭皮匠，顶一个诸葛亮"，这才觉得眼前一亮。虽然诸葛亮非常能干，没有人能及得上他的才干，但是蜀国还有很多大臣呢，把诸葛亮的工作分给蒋琬、费祎、杨仪，3 个顶一个总行了吧，那 3 个人效率只有诸葛亮的 1/3，但是工作是 3 个人分担，不会特别劳累的（码间串扰）。

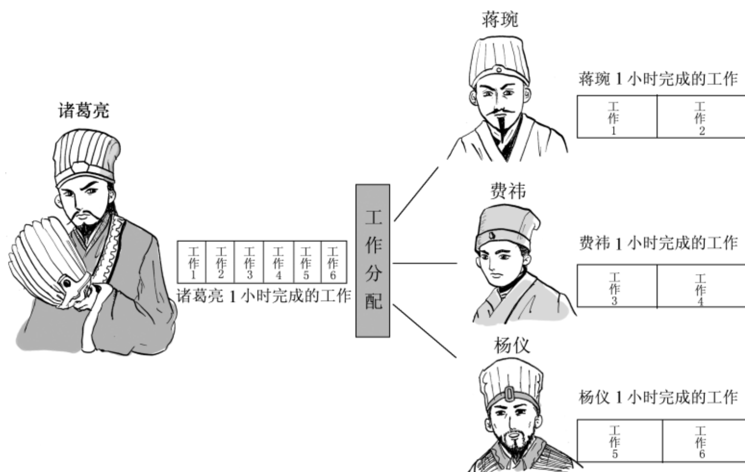


图 7.7　怎样减轻诸葛亮的工作压力

我们看到，在同等的时间里，蒋琬、费祎、杨仪的"码元速率"只有诸葛亮的 1/3，也就是"码元周期"他们是诸葛亮的 3 倍。但是通过工作的合理分配，诸葛亮一个小时内"串行"的工作变成了蒋琬、费祎、杨仪"并行"的工作。虽然 3 个人的能力要差一些，但是通过一起努力也能顶上诸葛亮。如果诸葛亮不是事必躬亲，而是给这 3 个人多派点活，最后蜀魏相争的结局会不会有所改变呢。

经过品读三国和对诸葛亮积劳成疾的原因进行深入的分析，3GPP 的专家们似乎也找到了码间串扰的终极解决途径。传统的无线数据业务总是采用了高带宽、高码元速率的方式（比如 WCDMA 5MHz 带宽，3.84chip/s 的码元速率；cdma2000 1.25MHz 带宽，1.228 8chip/s 的码元速率；TD-SCDMA 1.6MHz 带宽，1.28chip/s 的码元速率）。我们知道，码元周期就是码片速率的倒数，按原来的趋势发展下去，20MHz 的带宽码元速率势必更高，码元周期势必更短，这样就会带来严重的码间串扰问题。

可是，为什么我们的思路要沿着高带宽、高码元速率的方式上走呢？为什么我们不能考虑低带宽、低码元速率呢？



有人可能要说，比特速率跟码元速率是一一对应的，QPSK 就是 2 个比特映射 1 个码元，16QAM 就是 4 个比特映射 1 个码元，码元速率降下来最后的结果势必是单载波的速率也会降下来。这的确没错，不过我们为什么要采用单载波，为什么不把带宽均匀地分成 N 份，然后采用多个载波呢。通过把一个载波分成 N 个子载波，将码元速率降为原来的 $1/N$，这样虽然单个子载波的速率变成了原来的 $1/N$，但是总速率是这 N 个子载波的总和 $N \times 1/N = 1$，并没有下降。总速率没有下降，但是每个子载波的码元周期却扩展了 N 倍，从而大大提高了抗码间干扰的能力，这实在是很划算。

将带宽分成 N 份分配给 N 个子载波，每个子载波码元速率是原来的 $1/N$，码元周期是原来的 N 倍，最后的总速率保持不变，这就是正交频分复用 OFDM 中的“FDM”，也即频分复用。频分复用的概念并不新鲜，我们在第 2 章里面就提到过，不过其思考的出发点不一样，在 OFDM 中，主要是为了解决高带宽带来的码元速率提升、码元周期下降、码间串扰加剧的问题。我们从图 7.8 中看看具体是怎么做的，其实这个问题和图 7.7 中处理诸葛亮过度疲劳的问题有异曲同工之妙。

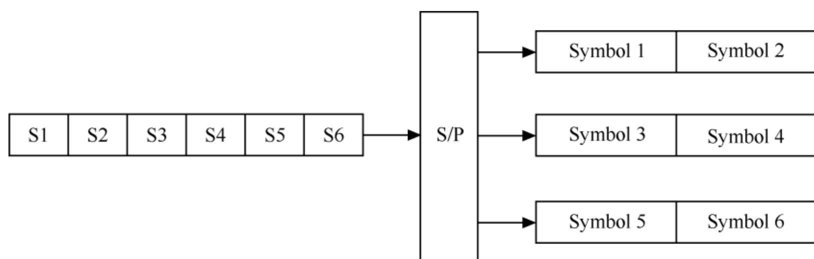


图 7.8　通过串并转换降低码元速率

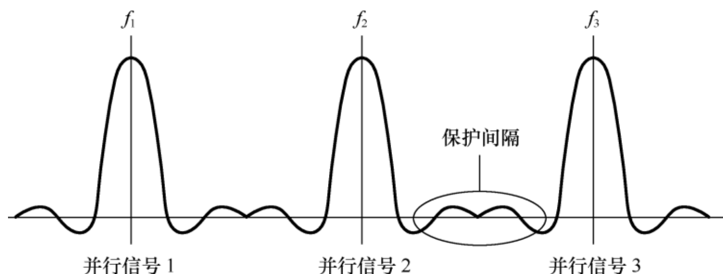
我们从图 7.8 中看到，为了降低多径效应带来的码间串扰问题，OFDM 采用了将串行的高速率业务通过串并转换（S/P，Serial/Parallel），变成 N 列低速的并行数据（为了画图简单起见，图中只画了 3 列）。这样一来码元速率就下降了，码元周期就大大扩展了，从而可以有效对抗码间串扰。最后，把这 N 列并行数据调制到 N 个低带宽的子载波上去，就完成了 OFDM 中“FDM”的过程。

我们在上文中已经多次提到了 OFDM 的子载波，这个子载波到底长什么样，我们不妨来看看。

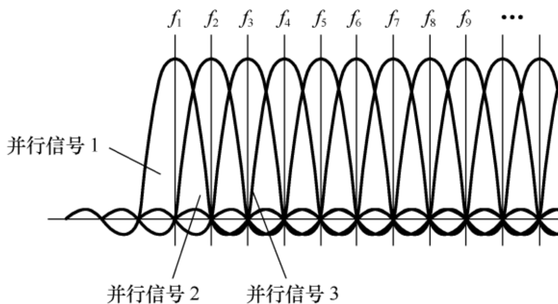
7.4.2　这正交的子载波—　谈谈 OFDM 的“O”

完成图 7.8 所示的串并转换后，每一行数据都应该调制到一个子载波上去了。这个子载波有什么特点呢，我们先来看看“FDM”的情况，然后再看看“OFDM”的情况。对于 FDM，我们并不陌生，如果是调制到 FDM 的子载波上，就会出现图 7.9（a）所示的情况。





（a）传统 FDM 频谱



（b）OFDM 频谱

图 7.9　FDM 与 OFDM 的频谱

传统的 FDM 载波和载波之间还需要有一定的保护间隔，而 OFDM 却足够强悍，子载波之间不仅不需要保护带宽，频谱之间还可以重叠。这样一来，图 7.8 所示的 3 路并行信号调制到 OFDM 上就比 FDM 上节约了不少频谱资源，从图 7.9 中可以很容易地看出来。这些子载波的频谱之所以可以重叠就是因为它们之间是正交的，问题是，怎样的子载波才可以正交呢？

的确存在这么一个载波系列彼此之间是正交的，那就是著名的正弦函数及其倍数系列，其实对于余弦函数而言也是一样。

假设 f_1 载波的频率为 ω_0，f_2 载波的频率为 $2\omega_0$，后面的载波频率依次为 ω_0 的倍数。那么这些调制载波就形成了一个正弦函数的序列$\{\sin\omega_0 t, \sin 2\omega_0 t, \sin 3\omega_0 t, \cdots\}$，这个序列看起来也很普通，好像没有特别的道道，不过大家拿起来一算，马上就会发现其中的奥妙之所在了。

$$\frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin m\omega_0 t \times \sin m\omega_0 t = \frac{2}{T}\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{1}{2}(1-\cos 2m\omega_0 t) = 1 \tag{7.1}$$

上式说明了，对于用 $\sin m\omega_0 t$（m 等于任一自然数）进行调制的子载波的信号而言，用 $\sin m\omega_0 t$ 的子载波就可以顺利地完成解调。那么我们用一个频率不相等的子载波 $\sin m\omega_0 t$（$n \neq m$）来解调会发生怎样的结果呢？

$$
\begin{cases}
\dfrac{2}{T}\displaystyle\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin m\omega_0 t \times \cos n\omega_0 t = 0 \\
\dfrac{2}{T}\displaystyle\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin m\omega_0 t \times \sin n\omega_0 t = 0
\end{cases}
\quad (n \neq m) \qquad (7.2)
$$

好家伙，只有自己这个载波能够解调出信号，别的载波一解调就变成了 0，完全正交，这个性质太棒了。这也就是 OFDM 中“O”的由来，即“FDM”后切成的一小块一小块的子载波是完全正交的。我们可以把余弦函数套入式（7.1）和式（7.2）中取代正弦函数，很容易得出一模一样的计算结果，也即余弦函数和正弦函数在这方面的性质相同。

我们看到，在图 7.10 中，信号 3（即高速串行信号转变为并行信号的第 3 个，图 7.8、图 7.9 有说明）经过 $\sin m\omega_0 t$ 调制后除了 $\sin m\omega_0 t$ 够解调出来以外，在其他子载波上的解调信号都是 0。这就是 OFDM 调制和解调的本质，实际上，在子载波上传输的是两路信号，一路是 $\cos m\omega_0 t$，一路是 $\sin m\omega_0 t$，两路相位相差了 90°，恰好是正交的。也可以把两路实信号理解为一路复信号。为了简单起见，本节中只提了 $\sin m\omega_0 t$，但无论传输一路信号还是两路信号，其本质和基本的方法没有变化，所以读者当前只需要按图 7.10 的方式来理解就好了，以后读到 OFDM 相关材料的时候可以以复信号的方式再推演一遍。

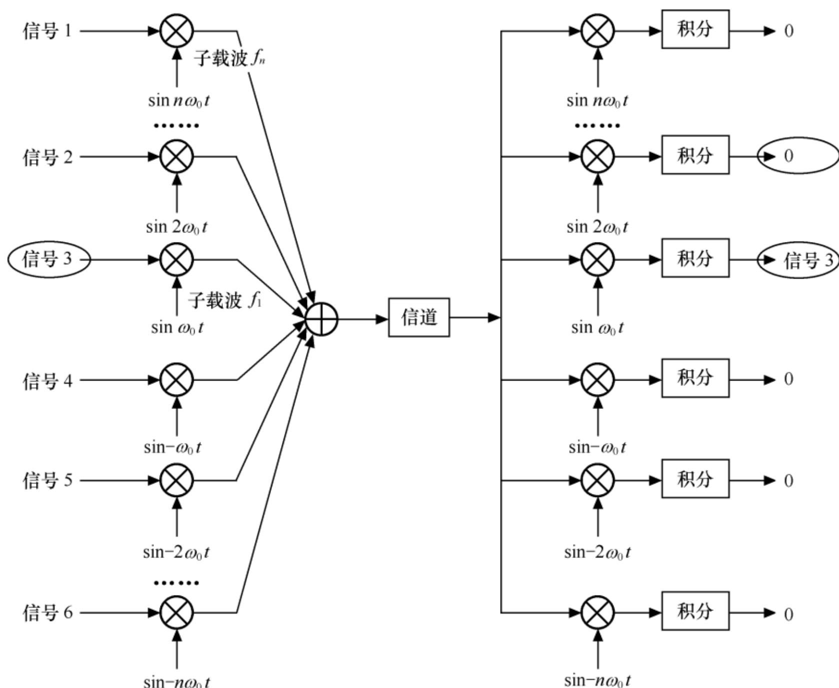


图 7.10　正交调制示意图



7.4.3　为了完美的信号而努力— 保护间隔和循环前缀

我们把高速的串行信号通过串并转换变成了低速的并行信号，然后将这 N 列并行信号调制到 N 个正交的子载波中，就完成了 OFDM 的基本过程。然而，事情到这里并不算完，如果这样就结束了，那 OFDM 也就太简单了。我们从图 7.6 中摘出中间那一段，如图 7.11 所示，我们会发现，通过将串行数据变成 N 路并行数据的方法能够扩大码元周期，降低码间串扰，但是降低并不意味着消除。码元周期再宽，由于多径效应造成的阴影总有那么一块横亘在那里，挥之不去。

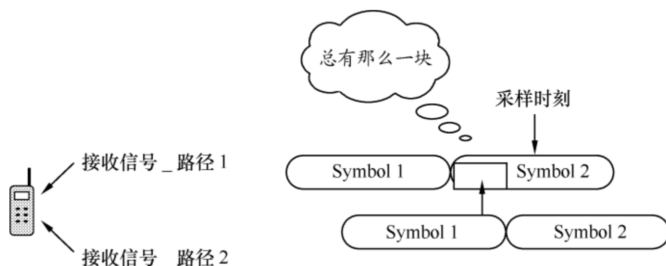


图 7.11　码间串扰依然存在

虽然图 7.11 中，接收路径 2 对接收路径 1 的码间干扰并不严重，只有一小块，但是毕竟还是存在的。能不能要求更高一点，把这一部分干扰也消除？办法一定是有的，而且并不新鲜，在 GSM 和 TD-SCDMA 中都挺常见，那就是在符号之间加入“保护间隔”，在保护间隔这段时间，啥信号也不传，通过空出一段资源不用来降低干扰，如图 7.12 所示。频谱的效率和通信的质量常常是一个两难的命题，由此可见一二。

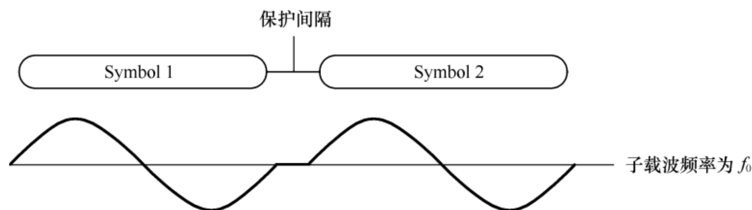


图 7.12　保护间隔

保护间隔真能解决由于多径效应造成的码间串扰吗？要对抗多径效应，又以多长的保护间隔为宜呢？

大家可以看到，在图 7.13 有两个径的接收信号，其中第一径信号没有延时，第二径信号的时延为Δt，我们从图中不难看出，只要时延Δt 不超过保护间隔，那么就不会有码间串扰的问题；换句话说，只要保护间隔足够大，大于现网可能的最大传播时延，那么就不会有码间串扰。听起来似乎需要很大的保护间隔，其实不然，大家看看图 7.2 就知道，不同信号的路程差大也大不到哪里去，实在过大的路程差，由于信号太弱，也体现

不出来。实际上，现网设置保护间隔就是按最大传播时延来设计的。

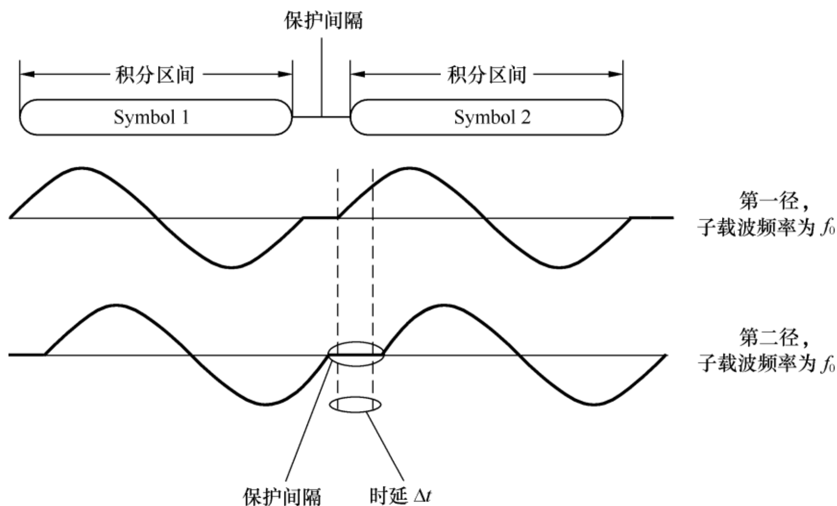


图 7.13　时延与保护间隔

通过设置保护间隔，困扰我们已久的码间串扰问题终于解决了。然而，保护间隔刚刚把一个老的问题解决，却又冒出来了一个新的问题，是什么问题呢？

假设此时频率为 f_0 的子载波和频率为 $2f_0$ 的子载波上的信号都没有时延，我们不难由式（7.2）得出这两个信号相乘为 0，这两个子载波是正交的。其实我们也可以感性一点，从图 7.14 得出一个直观的认识，这两个信号相乘的时候由于子载波 1 的 A 区域大小相等，方向也相等；而子载波 2 的 A 区域和 B 区域大小相等，方向相反，因此在这一区域内子载波 1 的信号和子载波 2 的信号相乘求和必然为 0。同理 C、D 区域也是如此，那么两个子载波相乘之后信号就为 0，从而实现了正交。这是没有时延的情况，有时延后还能实现正交吗？我们来看图 7.15。

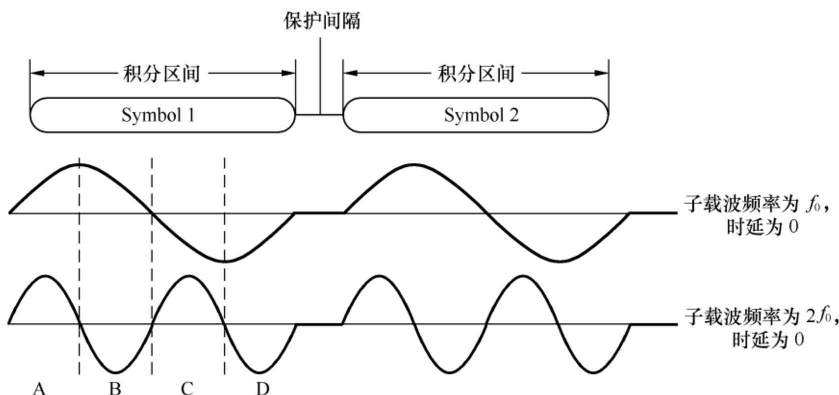


图 7.14　没有时延的子载波正交性



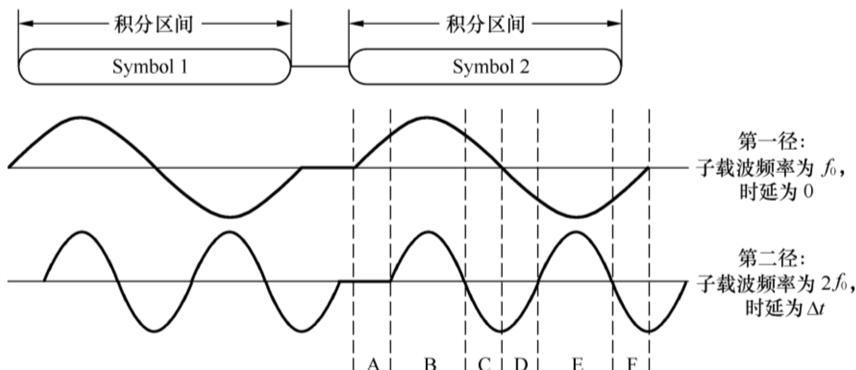


图 7.15　有时延的子载波正交性

要看图 7.15 中的子载波的正交性，我们不妨再来一次“看图说话”。就 A 段区域，子载波 2 的值为 0，那么乘积不用想了，也是 0；对于 B 和 E 区域，子载波 1 的信号大小相等、方向相反，子载波 2 的信号大小相等、方向相同，那么相乘然后两个区域相加，结果自然也是 0；对于 C 和 F 区域，子载波 1 的信号大小相等、方向相反，子载波 2 的信号大小相等、方向相同，那么相乘然后两个区域相加，结果还是 0；现在只剩下 D 区域了，D 区域相乘积分的结果肯定大于 0，那么整个信号相乘积分的结果也就大于 0，这两个子载波存在干扰，这也叫做子载波间干扰（ICI，Inter-Carrier Interference）。

怎么样来解决这个问题呢？我们可以在 A 区域和 D 区域动动脑筋，其他地方都是成对抵消，就这两个区域不能成对抵消，破坏了和谐。其实在这两个区域成对抵消的基础也是有的，因为子载波 1 在 A 区域和 D 区域存在一对大小相等、方向相反的波形，我们只需要在子载波 2 的 A 和 D 区域生成一对大小相等、方向相同的波形即可，也即在 A 这个为 0 区域加一段波形。这一段波形从哪里来呢？无数跟 OFDM 相关的书籍告诉我们，可以把尾巴上那一段波形复制到前面的 A 区域这个“保护间隔”上来，这也叫做“循环前缀”。“循环前缀”的生成过程如图 7.16 所示。

这样一来，每段波形在保护间隔的位置上不再是为 0 的一段直线，而是一段连续的波形，这段波形来自信号的尾部，从而形成了一段“循环前缀”加上“符号时长”的连续波形。循环前缀（CP，Cyclic Prefix）是 OFDM 中的一个很关键的元素，通常拿它来当保护间隔，防止码间串扰。

我们看到，LTE 最根本的一个任务就是大大提升数据速率。要提升数据速率，码元的速率必然也会大大提升（比特和码元就是等比例的映射关系）；码元速率一提升则必然会带来码间串扰问题。

为了解决码间串扰问题，LTE 引进了 OFDM 技术，OFDM 技术其核心思想就是首先通过串并转换将高速的串行信号变成低速的多路并行信号。然后将这多路信号调制到多个正交的

子载波上去，为了彻底消除码间干扰，OFDM 又在码元之间引进了空白的完全不发送任何信号的保护间隔，如此一来，同一个子载波之间码间串扰（ISI）的问题是解决了，但是不同子载波之间就会存在干扰（ICI）。为了解决这个问题，OFDM 通过将后部分的波形前置，形成“循环前缀”的方法来消除这个干扰，其实也就相当于用循环前缀顶替了原来的保护间隔。

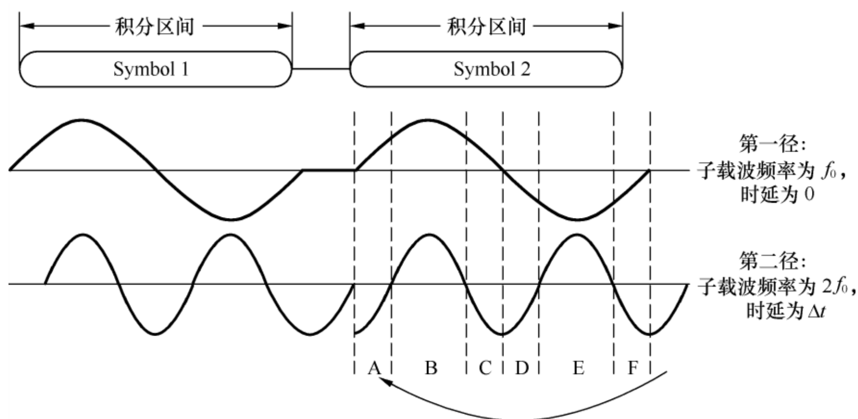


图 7.16　循环前缀的来历

值得注意的是，LTE 只是在下行使用的 OFDMA 多址方式，因为 OFDM 信号的峰均比 PAPR（Peak to Average Power Ratio）比较高，这就需要有一个线性度较高的射频功率放大器。而这种放大器需要比较高的成本，对于基站而言，这不是太大的问题，因为基站的数量相对手机而言毕竟不多，这点成本负担得起，但对于手机而言，就很成问题了。

因此 LTE 在上行链路采用的 SC-FDMA，SC-FDMA 是基于 OFDMA 针对上行链路的改良版，主要的改良点在于降低发射信号的峰均比 PAPR。

OFDM 的内容我们就介绍到这里，接下来我们来看看 LTE 另一项提升下行速率的关键项，也就是 MIMO 技术。

7.5 条条大路通罗马—　关键技术之 MIMO

在前期我们不断围绕多址方式、调制方式做了大量工作，一步步提升上下行的峰值速率，并使得频谱效率也得到了提高。不过，要进一步提升速率，光靠多址方式、调制方式的变化其潜力已经越来越有限了。如果一直按照当前的方式走下去，那么速率的提升就只能靠不断地提升带宽了，而频谱资源又是如此宝贵，用频谱换速率的做法就像是坐吃山空，显然是难以为继的。

真的就没有别的路可走了吗？谚语告诉我们，条条大路通罗马，放到通信的语境



里，就会发现一些有意思的事情。首先这句话是告诉我们车到山前必有路，当传统方式的潜力挖尽的时候，我们很有可能通过我们的智慧寻找到别的解决路径，事实上这种途径我们也找到了，那就是多输入多输出（MIMO，Multi Input Multi Output）技术。这种方式在 LTE 及 LTE-Advanced 里面越来越重要。再者，把这句话放到 MIMO 技术里，就更有意思了，MIMO 技术的物理实体就是发送端和接收端的 N 根天线，这些天线对应了 N 个通道，相比原来一根筋的单通道而言，真可谓是“条条大路通罗马”啊。

我们知道，对于单条链路而言，其容量受制于香农公式。不过 Foschini 等人将针对单条链路的香农容量公式推广到存在多个并行链路的系统中，给出了多天线系统的容量公式。正是在这一理论的指导下，BLAST（Bell Labs Layer Space Time，贝尔实验室分层时空编码）技术应运而生。

流行的观点认为每一个无线传输都要占用一段不同的频带，就像调频无线电台一样，在某一地理范围以内要分配不同的频段，否则干扰太大而无法进行通信。

但是 BLAST 的工作人员从理论上证明了利用同一个频段传输多个信号也是可能的，只要每个信号采取不同的发射天线进行发送，另外在接收端也要用多个天线以及独特的信号处理技术把这些互相干扰的信号分离出来。这样的话，在给定的信道频段上的容量将随天线数量的增加而成比例增加。

BLAST 是一种无线通信新技术，利用信道的散射来得到大的增益，利用信号的多径传播来提高系统的性能。贝尔实验室的研究人员已经在实验室里对 BLAST 进行了改进和验证，显示的结果令人感到惊喜，其频谱效率达到了 20～40bit/s/Hz，而使用传统无线调制技术仅为 1～5bit/s/Hz（蜂窝系统，大家可以看看表 7-2 给出的各个蜂窝系统的频谱效率，就会知道 20～40bit//Hz 这个数据是多么的恐怖）。

表 7-2　　各制式峰值速率与频谱效率比较

	载波带宽	调制方式	每载波峰值速率	频谱效率（每载波峰值速率/载波带宽）
GPRS	200kHz	GMSK	171.2kbit/s	0.85bit/s/Hz
EDGE	200kHz	8PSK	473.6kbit/s	2.3bit/s/Hz
WCDMA R4	5MHz	QPSK	3.36Mbit/s	0.67bit/s/Hz
TD-SCDMA R4	1.6MHz	QPSK	1.4Mbit/s	1.25bit/s/Hz（TDD 方式，扣除 30%的上行时隙开销）
cdma2000 1x	1.25MHz	QPSK	864kbit/s	0.69bit/s/Hz
WCDMA HSDPA	5MHz	16QAM	14.4Mbit/s	2.9bit/s/Hz
TD-HSDPA	1.6MHz	16QAM	2.8Mbit/s	2.5bit/s/Hz（TDD 方式，扣除 30%的上行时隙开销）



续表

	载波带宽	调制方式	每载波峰值速率	频谱效率（每载波峰值速率/载波带宽）
cdma2000 EV-DO Rev. A	1.25MHz	16QAM	3.1Mbit/s	2.5bit/s/Hz
WCDMA HSPA+	5MHz	64QAM	21Mbit/s	4bit/s/Hz
TD HSPA+	1.6MHz	64QAM	4.2Mbit/s	3.8bit/s/Hz（TDD 方式，扣除 30%的上行时隙开销）
cdma2000EV-DO Rev. B	1.25 × 3MHz	64QAM	14.7Mbit/s	3.9bit/s/Hz

贝尔实验室利用 30kHz 的带宽进行了测试，使用 BLAST 技术，传输速率可以达到 0.5～1Mbit/s，而使用传统的典型方法只能达到 50kbit/s。BLAST 是一种极具竞争力和技术优势的技术，可以显著提高无线系统的效率。

在 BLAST 系统中，输入数据被解复用到多个发射天线上，每个天线发射不同的数据流。如果不标识这些数据流，那么相互之间的干扰将减少容量增益。使用一些方法来标识这些数据流就非常必要，比如可以像 WCDMA 中一样使用 Walsh 码，但是 Walsh 码使用之后，扩频了，信号所占的频谱宽度却增加了 N 倍，这显然会降低频谱效率，很不划算。所以寻找一种不降低系统增益的标识方法就尤为重要。

如果有足够多的散射，信道本身就可以通过散射来标识，这要求在所有的天线单元之间有一定程度的相关散射。另外接收机必须知道信道的散射特性，接收机可以使用发射机的导频和训练序列来测量信道，这样接收机就可以区分它们，这并不需要增加系统带宽，只是增加了导频开销。

所谓导频和训练序列，其作用有点像正式足球比赛开始之前的“适应性训练”，球员通过适应性训练，对一个场地的各种性能都有了个估计和判断，正式比赛的时候就可以根据这些估计和判断对触球点、力度、出球方位做一个修正。同样，导频和训练序列的工作就是在发送正式的通信信号之前，先发送一串收发双方都知道的固定的序列，接收方根据接收信号与固定序列的误差，就可以估计出信道的特性，接下来传正式数据的时候就知道该怎么样对接收信号进行修正了。在 CDMA 系统里（包括 3G），导频的作用无非就是估计信道特性然后进行修正了，在 MIMO 里，还据此给信道打上标签，用以区分不同的信道。

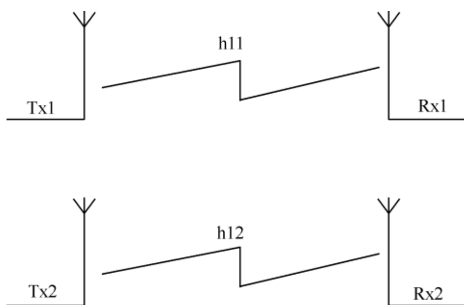


图 7.17　2 × 2 多天线系统中的信道标识

图 7.17 所示为一个多天线系统，h 是一对特定发射和接收之间的信道传播相关因子，为了简化，图 7.17 只给出一个 2 × 2 的 BLAST 系统。原来的数据流被分为两个半速率的独



立子数据流，一个在发射机 Tx1 上发射，接收机 Rx1 通过传播信道 h11（根据导频信道判断出来的，然后打上了这么一个标签）接收到这个信号，接收机 Rx2 通过传播信道 h12 接收到这个信号，对于发射机 Tx2 也是同样的情况。当传播环境中有足够多的散射时，增加频谱效率的关键在于这些相关因子之间是独立的，没有什么关联的。在室内环境中，四面都是墙，会存在多条反射路径，因此这种前提是显然成立的。在一个典型的宏蜂窝中，也有足够多的散射。

在解调所有的数据流之后，总的数据速率等于子数据流速率乘以天线个数，这样可以 N 倍地增加容量，而没有增加任何发射功率，无论多少个天线，这种增加都是线性的。随着天线个数的增加，各子数据流的功率减少，但是如果接收天线的个数也增加，那么同样可以保证接收功率，而没有任何代价。如果没有足够多的散射来标识这些子数据流，由于干扰，系统容量将减少。所以 BLAST 尤其适合于繁华和热点地区，因为那儿有足够多的散射，同时也有较高的容量和高速数据应用需求。如果在一望无际的平原农村地区，MIMO 的收益恐怕就不那么明显了，因为散射信道太少。

其实多根天线的系统我们之前并不是没有见过，从 GSM 开始就有发射分集，WCDMA、cdma2000 也不例外。而 TD-SCDMA 由于使用的是智能天线，跟普通的天线分集还不一样。

目前天线发射分集在 GSM 里面用的最多，也就是在相邻 10m 左右的地方竖起两根不同的天线，朝着同一个方向发射，这样可以改善下行信号的质量，多路信号并行，这就好比在歌剧院里在几个不同的方向都装上音响，你的耳朵能接收多个方向的信号，自然要听得更清楚。在上行方向，也可以得到增益，虽然手机的发射信号只有一路，但是天线可以多路接收，相当于给基站安装了多个耳朵，耳朵越多，自然听觉越灵敏，听得越真切。

我们知道，天线发射分集也好，MIMO 也罢，其关键点都在于使用了多根天线，物理实体是一样的，肉眼好像看不出很多区别，那么其关键区别在哪呢？其在网络中所起的作用又有什么不同呢？我们来看看图 7.18。

就基站侧而言，发射分集与 MIMO 都是需要两根天线，而对于一个 2×2 的 MIMO 而言，这意味着手机也需要两根天线。我们在上面主要介绍的 2×2 的 MIMO，其实对于 MIMO 而言，是可以做到 $M\times N$ 的，前面的 M，代表的是基站的天线数目，后面的 N，代表的是手机的天线数目。

$M\times N$ 的 MIMO 对于系统能带来多大的增益呢，理论上而言最多可以提升 $M\times N$ 倍速率。我们不妨来看看一些实例。

日本的 NTT DoCoMo 公司于 2003 年 5 月在外场试验中采用了 OFDM 技术，在 100MHz 带宽中实现了 100Mbit/s 的数据速率，并在其后通过 MIMO 技术不断打破其创

造的“峰值速率”的世界纪录，分别于 2005 年 5 月，2005 年 12 月和 2006 年 12 月在外场试验中实现了 1Gbit/s（采用 4 × 4 天线）、2.5Gbit/s（采用 6 × 6 天线）、5Gbit/s（采用 12 × 12 天线），向世界验证了 OFDM/MIMO 系统的硬件可实现性，展示了 OFDM/MIMO 技术在提供大宽带传输和高峰值速率方面的惊人能力，为业界采用 OFDM/MIMO 技术树立了信心。

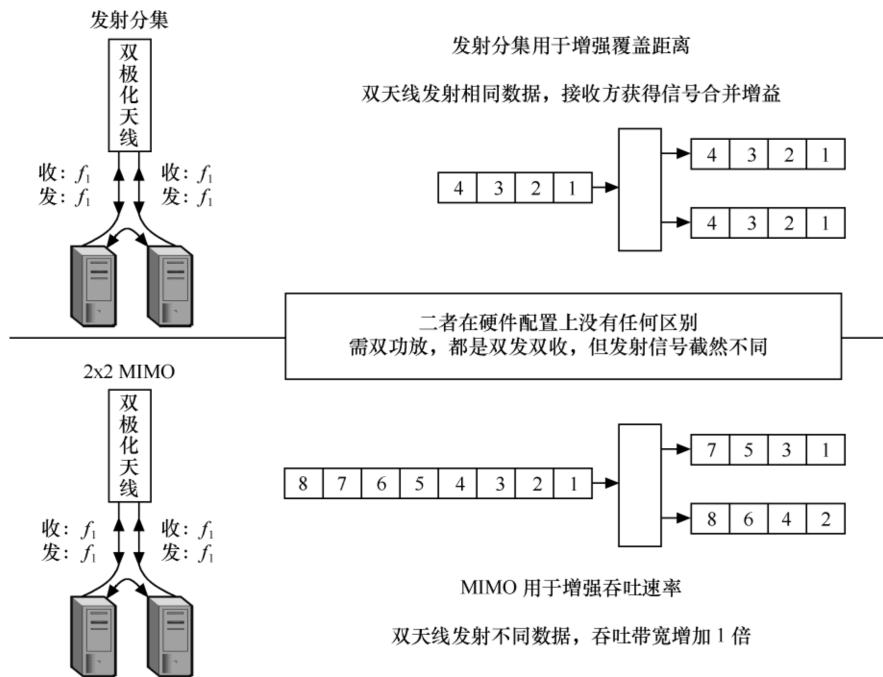


图 7.18　发射分集与 MIMO 在基站侧的区别

OFDM 和 MIMO 可谓是 LTE 中最核心的技术，两种技术其关键点都在于提升上下行的速率。不过我们在 LTE 需求那一节中就已经提到了，LTE 除了上下行速率以外，还有频谱效率、用户面时延、可变带宽等多种要求，我们来看看 LTE 在这些方面又做了哪些工作。

7.6 纵向删减，横向拉通— LTE 的卓越之道

传统的企业是金字塔式的，金字塔状的企业结构由高层、中层、基层管理者和操作层组成，董事长和总裁位于金字塔顶，他们的指令通过一级一级的管理层，最终传达到操作层；操作层的信息通过一层一层的筛选，最后到达塔顶。这样一来，反应的速度势必变慢，据说国



内某大型钢铁集团公司曾经失去大客户上海汽车一事，顶层管理者 3 个月后才知道。

针对这种情况，美国管理学家德鲁克一针见血地指出："组织不良最常见的病症，也就是最严重的病症，便是管理层次太多。组织结构上一项基本原则是，尽量减少管理层次，尽量形成一条最短的指挥链"。这也就是现在俗称的企业扁平化。

扁平化带来的另一个结果就是分权。对于金字塔状的企业而言，由于层级多，传递过程和时间长，信息易失真，因此实行的是绝对集权管理，要求下属绝对地服从上级的命令、听从指挥。同时一个上级指挥的下级也少，有精力对每个下级进行有效的管理。

而企业扁平化之后，原来一个上司只管 7 个下属，现在可能要管 30 个，覆盖面一广，从精力上而言不可能做到面面俱到，因此一般是以分权管理为主，权力中心下移，各基层组织之间相对独立，尽量减少决策在时间和空间上的延迟过程，这将提高决策民主化和决策的效率。

有时候不得不说人类的智慧是相通的，在企业由金字塔转向扁平化之时，移动通信网络几乎也发生了类似的变化。为了降低延迟，LTE 将从 2G 到 3G 都一直很重要的基站控制器去掉了，无线网络由"核心网—基站控制器—基站"3 级结构变成了"核心网—基站"2 级结构。在网络扁平化的同时，也不可避免地遇到了企业扁平化的问题，那就是一个上级（核心网）管的下属（基站）太多了，因此必须分权，所以，基站控制器的功能，大部分被下移到了基站，由基站自行进行决策。

在无线接入网发现变革的同时，核心网也在悄然兴起一场革命，其中心思想就是全 IP 化。有这样的思路并不奇怪，互联网蓬勃发展，而且互联网也被证明了可以有效承接话音业务（比如 Skype），作为一张以数据业务为中心的网络，LTE 有什么理由在核心网再保持电路域加分组域这种传统的模式呢。

比方说以往的蜂窝系统，往往是采取电路交换模式（比如 GSM），有的移动通信制式既有电路交换，又有分组交换（比如 WCDMA，它有 Iu-CS 口和 Iu-PS 口分别与核心网的电路域和分组域相连），而 LTE 仅仅支持分组业务，它旨在在用户终端和分组数据网络间建立无缝的 IP 连接，以后无论是话音也好，数据也罢，全部走全 IP 网络，这跟传统网络大大不同。

LTE 这个词的含义是 Long Term Evolution，长期演进的意思。演进包含两方面，一方面是核心网的演进，叫做系统架构演进（System Architecture Evolution），也就是那个全 IP 的分组交换核心网（EPC，Evolved Packet Core）；另一方面是无线接入网的演进，两者相加就构成了演进分组系统（EPS，Evolved Packet System）。上面专业术语比较多，读者可能看得比较头晕，作者之所以把它们都列出来是因为平时相关的资料或者文献里面经常提到这几个词汇。其实对于做无线的人来说，我们除了要记住 LTE 以外，其他几个名词比如 EPC、SAE、EPS 之类的可以暂且放在一边，不记得了就查书。接下来我们就从无线接入网和核心网两方面来阐述 LTE 相对 GSM 和 WCDMA 的变化。



7.6.1 世界是平的— 扁平化的LTE无线网

《世界是平的》是普利策奖获得者托马斯·弗里德曼最畅销也是影响最大的书籍，在全世界都享有盛誉。如果弗里德曼也搞通信，我想他还会写一本书，叫做《LTE是平的》。如果问LTE的无线网相对以前的蜂窝系统变革最大的部分在哪里，那么就在于网络的扁平化。

在这里，我们首先来介绍一下LTE的无线接入网。LTE在砍掉基站控制器RNC后，它的无线接入网（E-UTRAN，Evolved-UTRAN）就只剩下基站这么一个网元了，界面倒是清爽了许多。大家很容易发现一点，以前无线接入网叫做UTRAN，这里叫做E-UTRAN，基站以前叫做Node B，这里叫做eNode B，这里的e，就是evolved（演进）的意思，因为在LTE里面基站eNodeB承接了很多原来RNC的功能，所谓权力越大，派头越大，既然原来的上级 RNC 的部分功能都有了，那么名片就要修改一下了，从头衔上一定要能看出来和以前那些基站的区别，于是就加了一个“e”，有这么一个前缀大家一看到就能心领神会，哦，这就是LTE网络的基站，那个强大的特殊的具有RNC功能的基站！

我们看到，在UMTS中的Iub接口、Iu-CS接口和 Iu-PS接口不见了，取而代之的是eNode B和核心网之间的S1接口。如果将S1接口分得更细一点，又包括和MME相连的S1-MME接口以及和SGW相连的S1-U接口，如图7.19所示。关于MME和S-GW的功能我们暂且放到后面再说，大家在这里先把这两个设备笼统地理解为核心网。

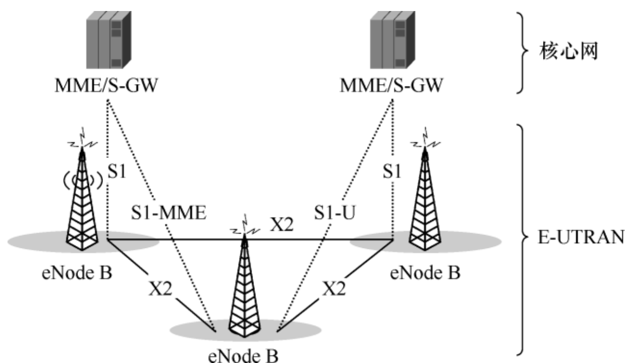


图7.19 E-UTRAN总体架构

由于RNC的功能大部分都转移到了eNode B上，假如你把eNode B看作是RNC的话，那么你很容易就能理解 S1-MME 和 S1-U 接口是做什么用的。S1-U 就相当于WCDMA中的Iu-CS接口和 Iu-PS接口的**用户面**部分，也就是纯粹走话音和数据的，在LTE中话音和数据都是走的分组域的IP包，没有什么差别了，所以不再有Iu-CS接口和Iu-PS接口之分。S1-U中的这个U也就是User，用户数据的意思。

S1-U 就相当于 WCDMA 中的 Iu-CS 接口和 Iu-PS 接口的**控制面**部分，走的都是信



令。这个 MME 的全称叫做移动性管理实体（MME，Mobility Management Entity）。所谓移动性管理，就是管管位置更新、鉴权加密之类的工作，因为无线资源管理（切换、功控等）这个本来是 RNC 的活已经由 eNode B 承包了，所以只剩下了这部分功能。

除了 S1 接口以外，eNode B 还有一个很有意思的接口，叫做 X2 接口。这个接口很特殊，特殊就特殊在于从 GSM 到 WCDMA，从 cdma2000 到 TD-SCDMA，基站与基站之间都不存在任何接口。但是在 LTE 时代，RNC 消失了，所以 RNC 的有些功能 eNode B 就不得不承接下来，比如说基站的负载和干扰消息，以及切换信息，以前是由 RNC 来进行交互的。现在没有 RNC 了，就需要通过 eNode B 的 X2 接口来进行交互。如果是以前，基站是不需要知道另一个基站的负荷情况的，因为它不需要操心切换，RNC 会来统计每个基站的信息，并作为切换和负载均衡的依据。这个 X2 接口就部分相当于以前 WCDMA 和 TD-SCDMA 中的 Iur 接口，以及 cdma2000 中的 A3/A7 接口。

我们不妨拿一个公司的例子来打比方，说明 LTE 的组织架构及接口情况，如图 7.20 所示。

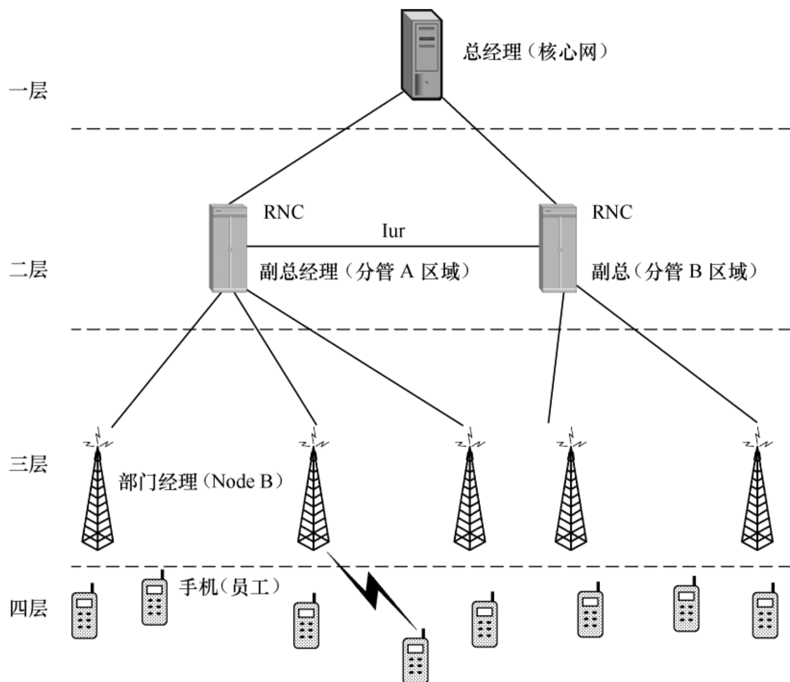


图 7.20　传统的 3G 网络结构

3G 网络结构是一个典型的金字塔结构，假如把核心网理解为总经理，总揽全局的话；那么 RNC 就是副总经理，分管某一个大的区域；基站就相当于部门经理，直接管理着一堆员工（手机）。

作为一个称职的副总，RNC 需要时时关注部门经理的 Node B 的负荷情况，比如是



不是手下管了太多员工（太多手机在交互信息），或者说业务量太大（话务、数据流量高），如果是的话，就需要对不同部门经理的工作量进行调整，这个就叫做“负荷分担”。

在企业待过的人都知道，一个员工想跨部门调动，从来就不是两个部门的部门经理就能说了算的，一定要到主管副总这一级。在无线网络中，也是如此，如果一个手机因为所在区域的变化要从一个基站的切换到另一个基站，这两个基站是没有发言权的，它们只能把手机的测量报告（调动原因）上报给 RNC，由 RNC 来进行决策，看到底该切换到哪个基站下。这个也是 RNC 副总的活——“切换”。

除此之外副总还要负责一个重要的事情，叫做“功控”。什么叫做“功控”呢，那就相当于员工的出差补助。如果离家比较远（距离比较远），一般补助会高一点（提高发射功率）。如果出差的地方条件比较差，环境比较艰苦（干扰严重，或者衰落比较厉害），通常也会多发钱来补偿（提高发射功率）。“功率控制”是移动通信中一个很重要的动作，在 CDMA 网络里尤其如此（需要用它来克服远近效应）。

这么多信息副总之间怎么交互呢，嗯，就是那个 Iur 接口，当然有的信息是先通过核心网，然后由核心网来和各个 RNC 互相交互，这也很正常，如果都是在下面就交互完了，不就把老大（核心网）架空了么。

应当说图 7.20 所示的结构运转得挺正常的，但是随着无线宽带化的趋势，未来势必有越来越多的像魔兽世界这样对时延要求很高的交互类游戏或者其他应用要跑在无线网络上，LTE 未雨绸缪，提出了无线网络 10ms 往返时延的要求，这不能不说是一个挺大的挑战。为了降低时延，LTE 公司把副总这一层砍掉了，由总经理直接管部门经理，减少层级，加快事情的处理，如图 7.21 所示。

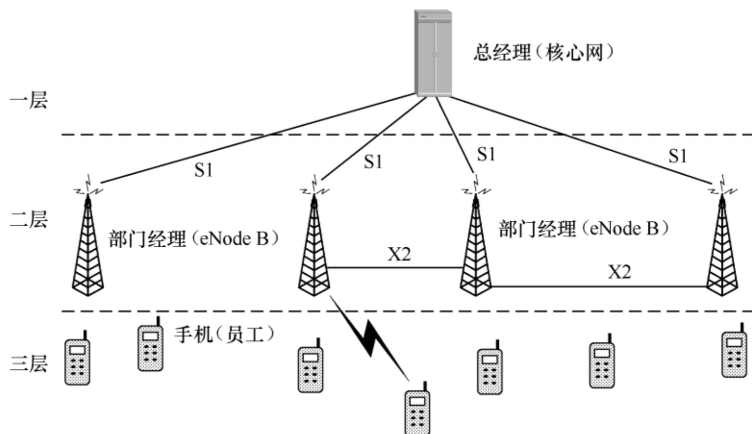


图 7.21　LTE 的 3 层网络结构

我们看到，为了提高反应速率，LTE 公司一狠心就精简机构了，裁掉的还不是普通员工，是副总经理！问题是，副总经理的这些活还得干，于是这些活就大部分下移到了 eNode B。



eNode B 主要通过 X2 口交互各种信令消息。请注意，我们在图 7.21 中每个 eNode B 只与另外一两个 eNode B 相连，实际上，是可以跟若干个相邻的 eNode B 相连的。更强大的是，eNode B 可以自动发现自己的相邻基站，并与它相连，这个是怎么实现的呢？

LTE 中有一个自动邻居关联功能（ANRF，Automatic Neighbour Relation Function），这个功能就是利用手机来鉴别有用的相邻的 eNode B 节点，即 eNode B 可以允许手机从另一个 eNode B 的广播信息中读取新小区的小区身份标识，然后把这个信息上报给 eNode B，这样 eNode B 就可以认为手机读到的小区信息就是它相邻的基站发的。这与传统的无线网络的邻区的鉴别方法有着本质的不同，甚至可以说完全相反。传统的邻区都是通过人工在仿真地图上比划的方式敲定的，然后在网络里进行配置，配置好的邻区信息是通过基站小区的系统消息的方式下发给手机的，手机对邻区既没有选择权，也没有建议权。如果某个邻区配置得不对或者配的是单向的，那么很容易就造成掉话，事实上现网很多掉话都是因为邻区配置不当引起的。传统邻区判别方法示意图如图 7.22 所示。

到了 LTE 时代，在这方面要大大迈进了一步，3GPP 的设计者们估计征集了很多运营商的意见。我们知道，在空闲状态或者信号传输的压缩状态之时，手机会对其他基站的信号进行测量，如果发现信号的强度比较高，那么自然说明这个就是邻区了，因为一般意义上信号强说明手机和该基站离得也近，信号差说明手机和该基站离得也远。我们不难理解，通过手机的测量情况来发现邻区的方案自然要比人工看地图然后对邻区情况进行拍脑袋的工作有效得多。说起邻区的检查和优化，估计做 GSM 网络优化的人最有感触，他们几乎每天都需要查找邻区的漏配、多配、错配情况，这些工作是如此之多以至于他们总是过着面朝电脑背朝墙壁的生活，看到 LTE 对邻区的自动查找，估计要泪流满面：“啥年代才能上 LTE 啊，俺实在是不想优化邻区了”。

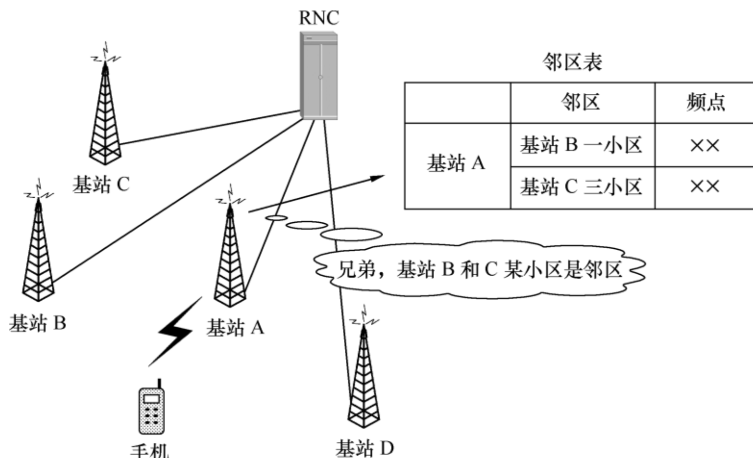


图 7.22　传统邻区判别方法



自动邻区管理功能（ANRF）是 LTE 引进自优化网络（SON）的非常关键的一步，另外一步靠的是 X2 接口自动的数据交换，如图 7.23 所示。只有有足够的负载、干扰、切换等信息，LTE 网络的自动优化才能运转得起来，因为没有数据就只能靠拍脑袋，这可不是电脑的长项。

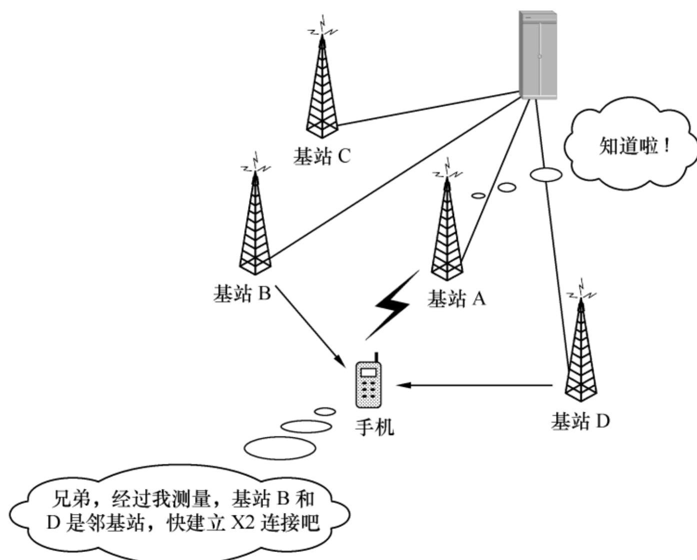


图 7.23　LTE 中的自动网络关联

7.6.2　车同轴，路同轨一　全 IP 化的 LTE 核心网

“天下大势，分久必合，合久必分”，这是《三国演义》中的经典台词，放到移动通信核心网的发展历程中来看也挺合适。最早的移动通信网是只有电路域的，GSM 也好，IS-95 也罢，都是这样，更不要提那个砖头般的大哥大了，整个核心网都是电路域的，这叫做“合”；到后来，数据业务的需求日益显现，于是在核心网侧除了电路域以外还有了分组域，比如 GPRS 中的 SGSN 和 GGSN，以及 CDMA 1X 中的 PDSN 和 AAA 鉴权服务器，核心网被分成了电路域和分组域两部分，这叫做“分”；LTE 设计之初就把满足数据业务放在了首位，加之 Skype 的成功，也说明了话音可以在 IP 网络上有效承载，所以一狠心就把电路域砍掉了，核心网又归一到分组域上，这叫做“合”。

所以我们看到移动通信的核心网也如三国一样经历了“合—分—合”的过程。三国的第一个合，合于“汉”，后一个合，合于“晋”；核心网的第一个合，合于“电路域”，后一个合，合于“分组域”。LTE 的核心网号称是 EPC 网络，如同 eNode B 一样，这里也用 E（演进）来标注自己的身份，我们看看有 E 的 LTE 的核心网和没 E 的 WCDMA、



cdma2000 的分组域核心网有什么区别。

1. cdma2000 网络的核心网（如图 7.24 所示）

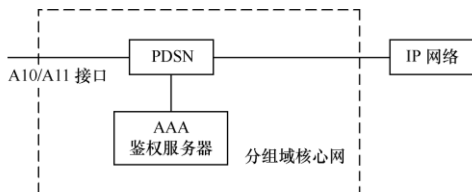


图 7.24 cdma2000 网络分组域

AAA 鉴权服务器的功能很简单，包含了鉴权、授权、计费功能。这个服务器的功能很重要，没有它运营商的网络就敞开让人用了，收不到费了。就好像健身房的前台一样，验证了你的会员卡才让你进（鉴权），然后每次运动完毕再进行收费（计费）。

PDSN 的主要工作是给手机分配 IP 地址，建立、维护和终止与手机的 PPP 连接，并将数据转发到外部的公共数据网络。我们看到，这个设备除了要维护一条无线连接以外（没有办法，谁让无线的链路比有线的复杂那么多），其他功能跟路由器很相似。

2. GPRS/WCDMA/TD-SCDMA 的核心网

3GPP 出于平滑演进的考虑，继承了 GPRS 的原有分组域核心网，如此一来，GPRS、WCDMA、TD-SCDMA 的分组域核心网基本上都是一致的，我们可以合到一起来看，如图 7.25 所示。

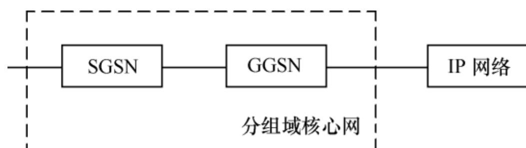


图 7.25 GPRS/WCDMA/TD-SCDMA 分组域核心网

SGSN 的功能有点类似于 GSM 电路域中的 MSC/VLR，其主要作用就是对移动台进行鉴权、移动性管理和路由选择。而 GGSN 的功能比较简单，那就是 IP 地址的分配和数据转发功能，然后生成计费信息，就相当于一台路由器。如果和 cdma2000 进行一下比较，我们就可以发现 PDSN 就相当于剥离了鉴权功能的 SGSN 和 GGSN 的合体。

3. LTE 的核心网（EPC 网络）

LTE 是 3GPP 发起的，由于思维惯性 UMTS 核心网的那些思路也会在 LTE 里有所体现。于是，我们想，一定会有和 SGSN 及 GGSN 相似的实体出现，如图 7.26 所示。

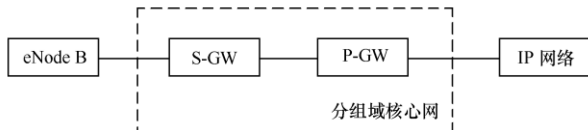


图 7.26 LTE 核心网（雏形 1）

其中，S-GW 是服务网关（Serving Gateway）的意思，它的功能和 SGSN 比较相似，但还不完全一样。它不仅要负责移动性管理，还要负责数据的转发，等于说把 GGSN 的一部分活都抢过来了。所以继承了 SGSN 的 P-GW 的 PDN 网关（PDN Gateway）就只剩下一个可怜的 IP 地址分配功能了。

我们知道，LTE 时代，下行的带宽大大提高了，可以达到 100Mbit/s 甚至更高，可以



拿“无线宽带”作为卖点来吸引用户了。但是大家知道，现在的有线宽带有一个特点，就是付费金额不同的用户可以得到不同的服务，比如说 720 元 2M 包年，1 300 元 4M 包年，等等。现在在 LTE 时代，带宽是共享的，那么运营商自然希望也设置不同的 QoS 等级，让付费更高的用户享受更好的保证带宽（GBR，Guranteed Bit Rate），这样运营商也可以赚到更多的钱。为了达到这个目标，LTE 又在核心网里增加了一个叫做 PCRF（Policy and Charging Rules Funciton，策略与计费规则功能）的设备，由这个设备来确定应该给用户怎样的 QoS 并通知 P-GW 执行，因此 P-GW 拜这个新政策所赐，又增加了一个新功能。那么分组域核心网需要做一点小小的调整，如图 7.27 所示。

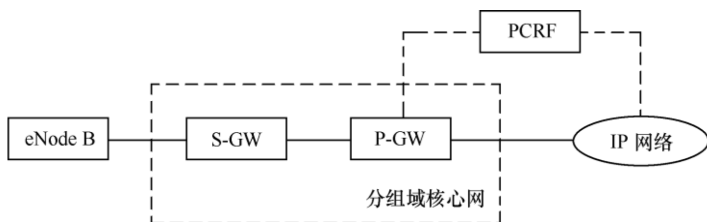


图 7.27　增加了 PCRF 的 LTE 核心网

大家看到，图 7.24 中 cdma2000 的核心网结构，没有包含 HLR；图 7.25 中的 GPRS/UMTS 核心网的结构中，也没有 HLR。莫非分组域核心网中，不需要 HLR 吗？

答案显然是否定的，开户信息、用户鉴权信息，以及用户现在所处的位置等重要信息都存储在 HLR 里，移动通信网里怎么可能少得了这个设备呢？图 7.24 中之所以没有 HLR，是因为 cdma2000 中的 AAA 服务器已经包含了类似的功能，在 cdma2000 中，电路域使用 HLR，分组域使用 AAA 服务器，这个我们在 6.3.2 节中已经讲过；图 7.25 中之所以没有 HLR，是因为我们为了简单起见，没有画出来而已，在 GPRS/WCDMA/TD-SCDMA 中，分组域和电路域都是共用一个 HLR 的，SGSN 都有到 HLR 的接口，叫做 Gc 接口。所以，很显然 LTE 里面也不可能没有 HLR，于是，我们在图 7.27 的基础上略微进行修改，就成了图 7.28。

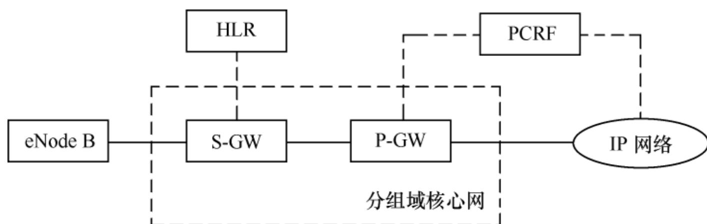


图 7.28　增加了 HLR 的 LTE 核心网

到图 7.28，应当说 LTE 的核心网已经很完备了，有人分配 IP，有人负责信息转发，有人记录用户信息，还有人控制 QoS 来赚增值服务费。但是 LTE 还是觉得不满足，它



觉得 S-GW 的信令的流量是比较少的，业务数据流量是比较多的，两种流量应该分开由不同的设备来承载，比如信令由 MME 来承载，数据由 S-GW 来承载，这样才更有效率、更经济。因为 S-GW 可能在一个地市放一台，MME 在省里放一台就够了。这也是继承了从 WCDMA R4 以来一贯的控制与承载分离的思想。我们对图 7.28 再进行一些修改，就成了 LTE 现网所采用的结构，如图 7.29 所示。

MME（Mobility Management Entity，移动性管理实体）是处理手机和核心网络间信令交互的控制节点，这个设备继承了一部分 RNC 的功能，比如位置更新、承载的建立和释放等。当然，RNC 的大部分功能都下移到 eNode B 中去了。

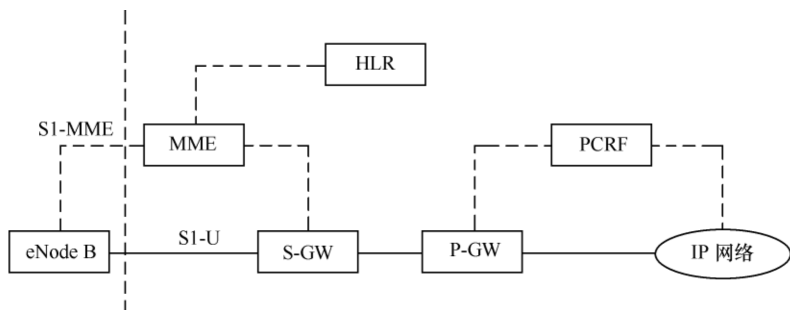


图 7.29　LTE 现网结构

到这里，我们就介绍完了 LTE 的无线接入网和核心网，以及 LTE 的两个关键技术 OFDM 和 MIMO，这几项构成了 LTE 的骨架。接下来我们想加一点细节的内容，将骨架填充一下，显得更有血有肉，要填充的内容是 LTE 的空中接口，毕竟，提到空中接口我们只讲到了 OFDM 和 MIMO 技术，这不过是 LTE 物理层所采用的多址技术，而我们介绍其他标准的时候都介绍到了帧结构和信道这一级，那么 LTE 也介绍到这一级的话也好比对。

7.7 万变不离其宗—　LTE 的物理层结构与流程

LTE 对物理层资源的划分跟 GSM 极为相似，在单天线的情况下（不算 MIMO），也是通过频率和时间两个维度来对资源进行划分。如果算上 MIMO 的情况，就还可以从空间的角度来进行区分，空间是通过多天线传输和接收技术来实现的，以“层”进行测量。为了简单起见，我们在这里只讨论单天线的情况，MIMO 的情况过于复杂，暂不展开讨论。

7.7.1　“井田制”—　GSM 和 LTE 的资源划分之道

当人类从狩猎文明转向农耕文明之后，必然会遇到一个问题，那就是土地资源该如

何分配。土地都是大自然形成的，大小不等，形状各异，宗族的族长给大家分配土地的时候，如果随手圈一块地就分给一个人，必然大小不均，显失公平。这个问题难不倒智慧的古人，土地天生大小不匀，我们可以后天给它划匀，一横一竖地画井字，长宽都固定，这土地不就划匀了么，如图 7.30 所示。

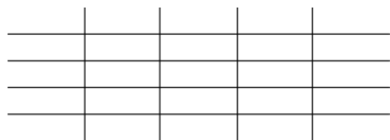


图 7.30　井田划分资源

1. GSM 与 LTE 的资源分配

GSM 也如法炮制，它以频率作为纵轴，时间作为横轴，也整出了这么一个围棋盘似的资源分配方案。从频率域上而言，GSM 上行从 890～915MHz，共有 25MHz，按 200kHz 这样一刀刀切下去，可以切成 75 个频点，也可以理解为 75 个载波；从时间域上而言，GSM 将一个 TDMA 帧切成 8 份，每个 TDMA 帧是 4.615ms，那么每个时隙的时间长度就是 0.577ms。频率上的 200kHz 和时间上的 0.577ms 组成了一个时隙，如图 7.31 所示。（下行的情况和上行完全对称，大家可以自行计算一下）



图 7.31　GSM 资源划分情况

大家应当仔细看一下图 7.31 对 GSM 频率与时间资源的划分，接下来再看 LTE 对频率与时间资源的划分，就会发现几乎长得一模一样，只是在参数和多址方式上略有差别，这些差别我们会在下面一一列举。

我们来看看 LTE 对资源的划分情况，首先看看时间域的划分情况。LTE 最大的时间单元是一个 10ms 的无线帧，分为 10 个无线子帧，每个子帧 1ms，这些子帧又分为 2 个时隙，每个时隙 0.5ms，相当于一个 LTE 帧有 20 个时隙。这与 GSM 略有不同，GSM 一个无线帧是 4.615ms，不到 LTE 的一半，然后每个时隙是 0.577ms，与 LTE 的 0.5ms 比较接近。另外，GSM 里面没有无线子帧的概念。

在每个时隙里，LTE 有 7 个 OFDM 的符号，至于一个符号对应多少比特，那要看调



制方式。关于调制方式，在本书里已经说过多次，就不在这里赘述了。

在频率域上，LTE 的一个子载波的宽度比 GSM 小得多，LTE 的是 15kHz，而 GSM 的是 200kHz。LTE 将频率切成这么细一条就是为了方便将资源进行灵活分配。大家可以从图 7.32 中看看资源分配的情况。LTE 支持的最小带宽是 72 个子载波，也即 1.08MHz。

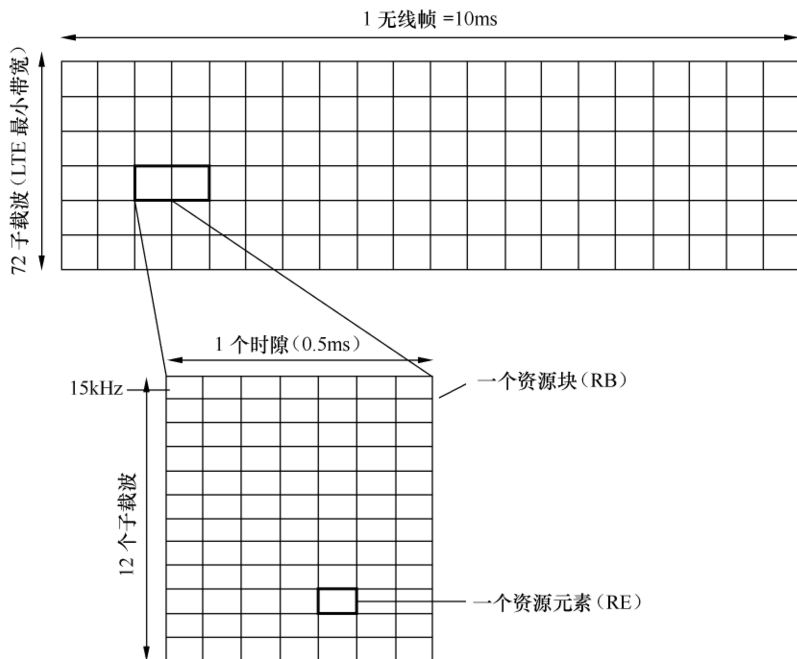


图 7.32　LTE 资源划分情况（常规循环前缀方式）

接下来有两个非常重要的概念，在 LTE 里面用的很多。第一个是 RE（Resource Element，资源元素），它由**频率上的一个子载波**和**时间上的一个 OFDM 的符号持续时间**组成，这是资源的最小单元；第二个是 RB（Resource Block，资源块），资源块在频率域上占用了 12 个子载波（也即 180kHz），在时间域上占用了一个时隙（也即 0.5ms），图 7.32 的下半部分就是一个资源块。

2. LTE 的帧结构

我们随手摘出**一个子载波**在时间上的序列，如图 7.33 所示，就是所谓的一个无线帧了。现在这个无线帧是一片空白，我们按照协议规定的标准的格式填进去，即是所谓的无线帧结构了。帧结构有两种，其中一种用于 FDD-LTE，另一种用于 TDD-LTE，就是现在中国移动到处搞试点的 TD-LTE。

（1）FDD 帧结构。

适用于 FDD 帧结构的一个无线帧为 10ms，一共 10 个子帧，每个子帧 1ms，包含两

个时隙，每个时隙 0.5ms，如图 7.34 所示。



图 7.33　LTE 的无线帧

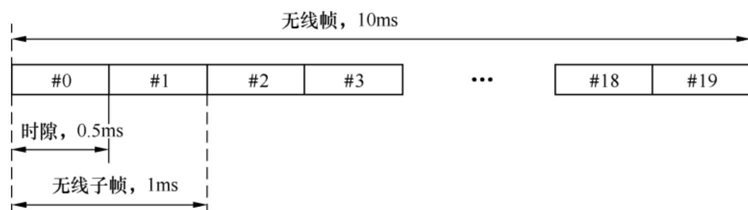


图 7.34　FDD 帧结构

（2）TDD 帧结构如图 7.35 所示。

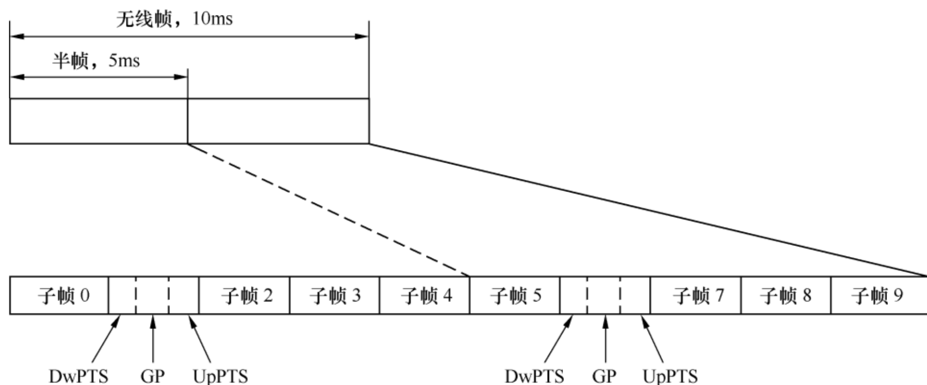


图 7.35　TDD 帧结构

我们看到，TDD 的帧结构与 FDD 的很相似，不过是把两个子帧单独拎出来用来做同步。这两个特殊子帧都包含 3 个特殊时隙——上行导频时隙（Uplink Pilot Time Slot）、下行导频时隙（Downlink Pilot Time Slot）和保护时隙（GP，Guard Period），这 3 个特殊时隙总长为一个子帧的时长 1ms。这 3 个时隙似乎让我们想起了点什么，那就是 TD-SCDMA 的帧结构，如图 7.36 所示。

我们看到，TDD-LTE 与 TD-SCDMA 的帧结构在某些方面非常相似，都是 10ms 的无线帧，都分成两个 5ms 的半帧。在这 5ms 时间里，TDD-LTE 有 4 个常规子帧和 1 个特殊子帧，其中这个特殊子帧用来进行上下行的导频；而 TD-SCDMA 有 7 个常规时隙



和 1 个特殊时隙，其中这个特殊时隙也是用来进行上下行的导频。

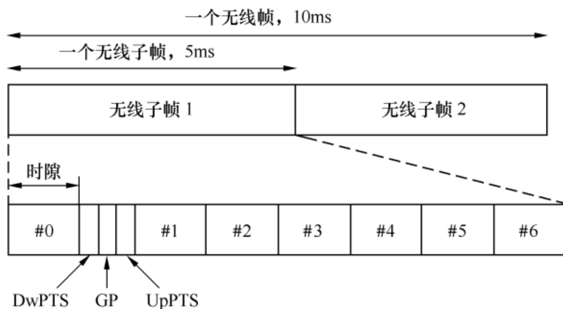


图 7.36 TD-SCDMA 的帧结构

在本章中，为了简单起见，讲述的都是 FDD-LTE，如果读者对 TDD-LTE 感兴趣，请参考相关书籍。

关于 LTE 的下行链路的资源划分和帧结构就介绍到这里，上行由于采用的是 SC-FDMA 多址方式，与此略有不同，就不再加以详细的阐述。接下来让我们来了解一下 LTE 的基本工作流程。

7.7.2 “面经”是怎样总结出来的— LTE 的物理层工作流程

作者没有当过“面霸”，但作者见过货真价实的“面霸 120”，此人身经百战，面试过大大小小的无数公司。最后他总结出很凝练的几条经验，说 HR 的面试无非也就是那几个问题：“第一问你为啥放弃现在工作选择我司，看看你跳槽是有长远想法还是缺乏考虑，免得你很快又闪人；第二问你对我司的企业文化、工作强度、提供岗位有啥看法，看看两者之间合不合拍；第三对你的专业水平进行测试，看看你值多少钱”。现在网上流传的 *N* 多“面经”（面试经验），想必就是这样的“面霸 120”总结出来的吧。

实际上，当你经历多了各种移动通信制式的通信流程之后，你会发现 GSM、CDMA 也好，WCDMA、TD-SCDMA 或者 LTE 也罢，很多流程或者信令方面的东西都是相通的。比如说 3G 和 LTE 都需要先进行同步，只有同步之后才能进行其他的工作；同步之后需要导频，从而对信道进行估计；导频之后需要解读系统消息，只有解读了系统消息才能知道网络的一系列相关参数，然后进行下一步动作；都需要监听寻呼，否则没法当被叫。这样总结一圈下来，或许你也可以整个什么“流程经”、“信令经之类”的。

在本小节里，我们不妨拿 WCDMA 来和 LTE 进行一番工作流程上的比较，由于 WCDMA 的制定年代离 LTE 较近，因此相似之处要更多。

1. 看电视，先校准时间

在当年手机和电子表还不是如此流行的时候，人们都习惯戴那种老式的上发条的手

表。手表的作用是很重要的，要是你没有手表，搞不好你会上班迟到，赶火车晚点。所以那个年代的人结婚，手表和缝纫机、自行车一样，并列为结婚 3 大件。如果有了手表，但是时间不准，上面那些麻烦同样存在，所以当年晚上 7 点的新闻联播对于很多人还有一个特殊的意义，那就是校准手表。在 7 点新闻联播音乐响起的那一刹那，你也按下了手表的机芯，时间对准了，意味着你和这个世界同步了，工作可以正常开展了。

对于通信系统而言，这个同步来得要更重要，由于通信系统传递的都是一串串“0”，“1”的码流，如果在时间上没有统一标准，不同步，接下来的动作会很麻烦。所以 LTE 的第一步动作，也是进行同步。WCDMA 的同步是在每个时隙的头 256 个码片，那么 LTE 的同步信号会是在哪个位置呢，由于每个子载波的信号都需要同步，因此每个 10ms 的无线帧都会有同步信号，我们来看看图 7.37。

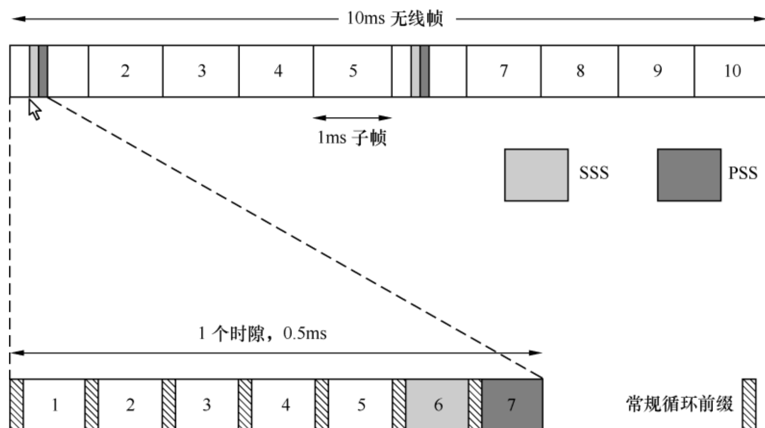


图 7.37　LTE 中的同步码（LTE 概述——华为）

在 WCDMA 里面，分为主同步码（PSC）和从同步码（SSC），主同步码用来确定时隙的边界，从同步码用来确定帧的边界以及主扰码的组号，具体怎么实现的我们在 4.3.2 节中讲过，大家可以参考一下。在 LTE 里面也如法炮制，同步也分为两部分，即 PSS（Primary Synchronizaiton Signal，主同步信号）和 SSS（Secondary Synchronizaiton Signal，从同步信号）。

我们从图 7.37 中看到，PSS 总是处在第 1 个时隙或者第 11 个时隙的最后一个 OFDM 符号上，而 SSS 总是和它挨着，一般位于倒数第二个 OFDM 符号上（图中显示的 1 和 6 指的是子帧号，一个子帧包含两个时隙）。

PSS 和 SSS 的作用与 WCDMA 中的 PSC 和 SSC 很相似，也是 PSS 用来对时隙进行定界，而 SSS 用来对帧的边界位置进行敲定，SSS 还可以得到小区识别号。

2. 信号不好，调调天线

以前的电视机，黑白的也好，彩色的也罢，都是接收的无线电磁信号，而不像现在



一样接收的是广电提供的有线闭路电视信号。既然是接收无线信号，那么电视机就像现在的一些收音机一样，机体还带着一根天线。如果看着觉得信号不好，就可以对天线进行调整，拉长缩短，调左调右。

我们可以拿电视机上的图像跟生活中所见到的图像进行对比，如果出现变形就意味着信号质量有问题，需要进行调整和校正。在这里，我们生活中见到的图像充当了“导频信号”，如果发现电视机上的图像与之反差很大，就知道信号不对了，需要校正。

在无线通信中，导频起的也是相同的作用，导频信号是一串收发双方都知道的固定的序列。导频信号通过信道发送之后可能会有失真，会有丢失，接收端根据已知的固定序列一比对就知道问题出在哪里，就可以对信道进行校正。

我们看到，在 LTE 里，同步信号是每个子载波上都有的，但是对于导频信号而言，这样做没有太多必要。因为 LTE 的子载波之间的频率相差也就 15kHz，这是与其他制式完全不同的，在之前，GSM 的信道带宽可以算很窄了，也有 200kHz。子载波之间的频率差别如此之小，那么相邻的子载波之间信道差异也不会很大，所以没有必要那么奢侈，几个子载波共用一个导频信道就好，如图 7.38 所示。

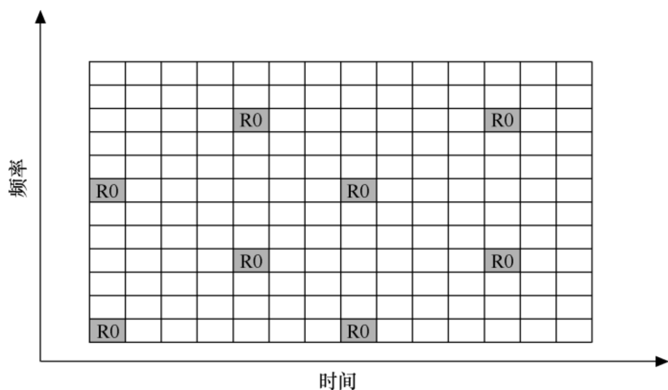


图 7.38　LTE 的参考信号

图 7.38 中的阴影区域并标识了 R0 的格子说明那是参考导频信号。大家数一数图中的横轴和纵轴的格子。纵轴是 12 个格子，也就是 12 个子载波；横轴是 14 个格子，也就是 14 个 OFDM 符号。对数字敏感的人或许察觉了什么，12 个子载波和 7 个 OFDM 就组成了一个 RB 资源块（见 7.7.1 节的图 7.32）。这也就是说，图 7.38 中的 8 个导频 OFDM 符号存在于两个 RB 中，也即每 3 个子载波才有一个导频符号，比起每个子载波都放导频信号来说还是节约了不少资源。

3. 欲看电视，先看导播信息

手表的时间对好了，发条拧上了，电视的天线位置也校准好了，接下来该干什么呢？



毋庸置疑，肯定应该先看导播信息，电视台总会隔段时间就播放导播信息，好让你知道有些什么节目，都分布在什么时间，这些导播信息跟移动通信网中的系统信息非常相似。LTE 在前两个步骤里进行了信号的同步，又给出了导频参考信号用于信道估计，接下来的事情就是收听系统消息了，这在 WCDMA 和 LTE 中均无例外。WCDMA 在用 P-SCH 和 S-SCH 完成同步，用 CPICH 导频信道进行校正之后，接下来做的工作也是收听系统消息。其实不止 WCDMA，GSM、CDMA、TD-SCDMA 莫不如此。

在 LTE 中，是利用 PBCH（Physical Broadcast CHannel，物理广播信道）来传输系统消息的。PBCH 很有意思，不管 LTE 采用的带宽是多少，它永远都是只占用中间那 72 个子载波来传输数据（72 × 15kHz = 1.08MHz），这下大家可以理解 LTE 的最低带宽为什么是 72 个子载波了吧，低于 72 个子载波系统广播消息都没法发送全，接下来的工作不好开展啊。

我们可以看到，图 7.39 上半部分表示的是有 N 个子载波，PBCH 占了中间的 72 个子载波用于发射信号。图中所示的是 6 个 RB，一个 RB 在频率轴上占 12 个子载波，因此 6 个 RB 就是 72 个子载波。我们从中截取一个无线子帧，即两个 RB，放大来看，如图 7.39 的下半部分所示。

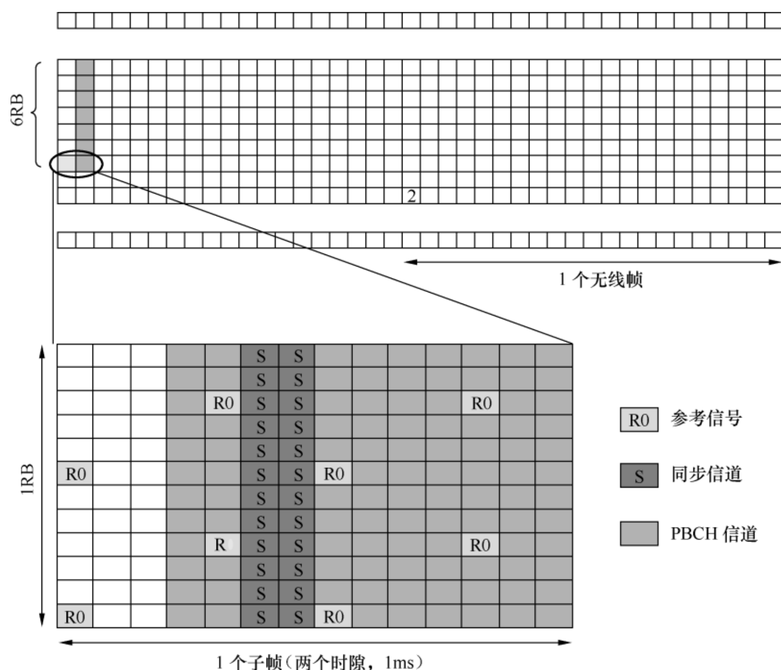


图 7.39　PBCH 结构

下半部分的前 3 列，也就是前 3 个 OFDM 符号除了导频参考信号以外没有填充其他信号，其实这部分是用来走信令的，我们在这里不展开详述。由于图 7.39 取的是第一个



时隙，所以符号 6 和符号 7 都是用来做同步的信息，至于其他部分，就可以用来传送 PBCH 信息了，PBCH 的空余地方，还可以用来传送 PDSCH 信息，那么什么是 PDSCH 信息呢？

4. PDSCH，LTE 的正餐

如同吃饭一样，开餐前的小点心凉菜只是用来开胃的，后面的才是正餐。前面的同步、导频和播放系统消息，目的无非是一个，为了传送话音和数据，以及伴随话音和数据的信令，那么这些信息承载在哪呢？答案就是 PDSCH（Physical Downlink Shared CHannel，物理下行共享信道）。

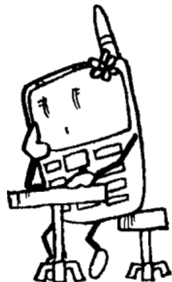
物理下行共享信道（PDSCH）是 LTE 承载主要数据的下行链路信道，所有的用户数据都能使用，还包括没有在 PBCH 上传播的系统广播消息，以及寻呼信息——LTE 系统中没有特定的物理层寻呼信道。PDSCH 通常以资源块为单位进行调度。

由于 PDSCH 没有特殊的位置，所以在本节中也就不再就 PDSCH 画框图。

到这里为止 LTE 的基本内容就介绍完了，我们在本章中介绍了 LTE 的来历，所期望达到的目标，以及两大关键技术——OFDM 和 MIMO。除此之外，我们还描述了 LTE 在无线接入网侧和核心网侧发生的变革。最后，我们介绍了 LTE 资源的划分方法以及使用得最多的信道。

应当说，LTE 离 4G 技术还有相当一段距离，为了更高的速率、更低的延时、更优的架构、更低的成本，人们还在不断努力，将 LTE 继续向前演进，这就是 LTE-Advanced。

第8章 Chapter 8



迈向 4G— LTE-Advanced

在第 7 章说过，在 3GPP 组织的规划中，原本是打算 2008 年启动 IMT-Advanced 的标准制定的。在 WCDMA 和 IMT-Advanced 之间，原本是不存在 LTE 的，但是因为 IEEE 的 WiMAX 的横空出世，3GPP 不得不将大部分资源集中起来投入到 LTE 上以应对挑战。

到 2008 年 3 月，LTE 的标准已接近尾声，借 ITU 征集 4G 标准——IMT-Advanced 之机，3GPP 也开始在 LTE 的基础上继续进行演讲，新标准的名字没有什么创意，叫做 LTE-Advanced，先进的 LTE。

既然号称 4G，既然号称 Advanced，那么相比以前一定有一些不一样的东西，我们来看看 LTE-Advanced 都给我们带来了哪些值得期待的东西。

8.1 4G 的愿景— “我有一个梦想”升级版

对于无线通信，人们很早就提出过美好的愿景，那就是“在任何时间、任何地点与任何人进行任何类型的信息交换”。

应当说到了第一代通信大哥大的时候，终于把人们从电话线的束缚中解脱出来，人们终于可以边走边打电话了，然而，有限的网络覆盖，七国八制的通信标准，使得在任何地方都能打电话还只是一个梦想。为了解决覆盖问题，摩托罗拉提出了一个颇有点理想化主义色彩的“铱星计划”，号称全球无缝覆盖，然而铱星计划最终因为成本远远高出了用户的承受能力而破产。

不能支持漫游，保密性差，到一种网络换一种终端，随着用户的快速发展，传统的模拟移动通信的毛病体现得越来越明显。痛定思痛，欧洲的 ETSI 终于打算结束这种杂乱无章的局面，开始制定 GSM 标准，GSM 的全称是 Global System of Mobile Communication，全球移动通信系统，看这个名字就能知道其野心，无非是想建立一个全



球统一的通信系统。可惜，北美的 CDMA 斜刺里杀出搅了 GSM 的好局，GSM 虽然三分天下有其二，毕竟未能实现一统。不过，GSM 的广泛应用和全面覆盖使得“任何地点”能够打电话终于基本得以实现。接下来的问题就是要解决传递“任何信息”的问题，GSM 通过升级到 GPRS 和 EDGE，使得无线通信网不再是一张单纯的话音网络，而是具备了数据功能。但是无论是 GPRS 也好，EDGE 也罢，其上网速率都太慢了，如果想开展视频点播或者其他需要高速率支持的数据业务，就显得力不从心，对于“任何信息”而言，只能算是实现了一部分。

到了 3G 时代，WCDMA、cdma2000 EV-DO、TD-SCDMA 分别支持 14.4Mbit/s、3.1Mbit/s、2.8Mbit/s。这样高的速率对于绝大多数的数据业务而言都够了，到此为止，“任何信息”总算是实现了。

目标实现了是不是就完了呢？邓丽君有一首著名的歌叫做《漫步人生路》，里面有一句歌词“越过高峰另一峰却又见，目标推远，让理想永远在前面”，这句歌词很好地描述了无线通信标准从历史到今天乃至以后推进的状况。虽然 WCDMA 以及其他两大 3G 标准很好地实现了最初的梦想，但是从 WCDMA—HSPA—LTE—LTE-Advanced，人们并没有满足，其要求越来越高，想法越来越多，其实也唯有如此，才能推动无线通信技术不断向前进步。我们来看看 LTE-Advanced 具体有哪些想法和要求。

（1）速率与时延：LTE-Advanced 毕竟定位是“无线的宽带化”，作为宽带，上行下载速率对视频类和下载类业务关系重大，而时延与交互类游戏的体验息息相关，大家想一下自己上网的体验，就知道这两个指标的分量。

在峰值速率上，LTE-Advanced 要求低速移动的情况下下行能达到 1Gbit/s，上行峰值速率为 500MHz。大家可以发现一个有意思的现象，LTE 当初提需求的时候就是下行 100Mbit/s，上行 50Mbit/s，LTE-Advanced 的这两个要求恰好是 LTE 的 10 倍；而在高速移动的条件下，要求下行峰值速率为 100Mbit/s。下行峰值速率达到 1Gbit/s 是 4G 技术的重要标志，从 HSPA 到 LTE，一直都没有越过 M 这个数量级，现在终于到 G 了，这是一个里程碑般的数字。

在 LTE 时代，对时延的要求是从空闲状态到连接状态时延小于 100ms，从睡眠状态到激活状态转换时延低于 50ms；而到了 LTE-Advanced 之时，从空闲状态到连接状态时延小于 50ms，从睡眠状态到激活状态转换时延低于 10ms。

（2）有效支持新频段和大带宽。

频谱资源在全世界都是个稀缺货，LTE 需要的频谱资源又多，着实令人为难。因此 ITU 四处搜集空闲的频谱，与此同时也要求 LTE-Advanced 能够支持多个频段。都有哪些频段呢？

其中包含了 450～470 MHz、698～862 MHz、790～862 MHz、2.3～4.2GHz、4.4～



4.99GHz。能凑出这么多频段也殊为不易。3G 的传统频段集中在 2.1GHz，现在到了 4G，开始出现了多个频段共存，且高低分化的局面。LTE-Advanced 的大量频谱资源集中在 3.4 GHz 以上的高频段上。在 2.1 GHz 的 3G 频段上，就已经出现了覆盖能力和穿透建筑物的能力不够的情况，遑论更高的频段。

因此 ITU 在规划频段的时候，就考虑了在不同的场景下应用不同的频段。数据业务当前呈现了明显的不均匀分布的状况，大部分的容量需求集中在室内和热点区域，据日本的 NTT DOCOMO 统计，80%的数据流量是发生在室内的。因此，高频段就可以用于室内覆盖场景，提供大容量高速率业务，从而可以弥补它穿透力不足和覆盖、移动性方面的弱点。

在图 8.1 中，采用高频段用来专门覆盖室内和热点区域内的低速移动用户，将大部分容量都吸收到高频段中，从而可以将覆盖效果比较好、穿透能力比较强的低频段频谱节省下来用于覆盖室外的广域区域以及高速移动用户。

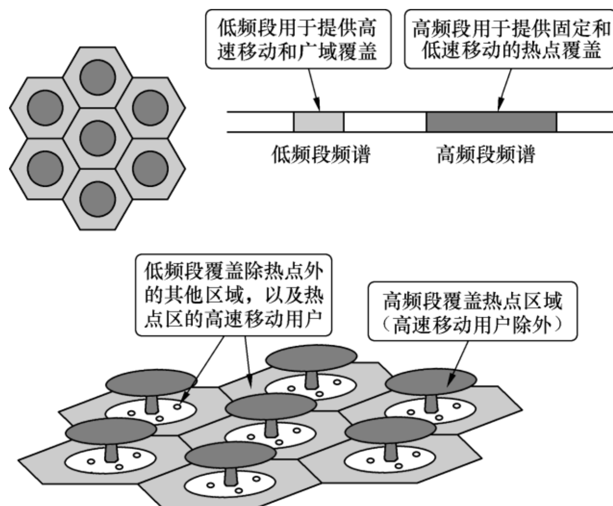


图 8.1 多频段层叠接入网络结构

我们可以把 LTE-Advanced 理解为一个“分层”的结构，底层采用的低频段，用来做广覆盖，保证每一个用户能够接入。而在这张网络之上，又选取若干热点，在这些热点上叠加高频段，用来保证容量。通过多个频段的紧密协作，就可以有效地满足 LTE-Advanced 在高容量和广覆盖方面的双重需求。既然这两个需求单纯用高频段（覆盖效果差）和单纯用低频段（频谱资源少，容量不够）都没法解决，那么我们就采取兼容并包的方式来处理吧。

（3）高频谱效率。

应当说就单条链路而言，HSPA 已经是很接近单条链路的香农极限了。如果没有



MIMO，想提升上下行速率只能通过更多的频谱资源的消耗来换取。对于频谱资源很稀缺的无线通信而言，这种奢侈的玩法显然是耗不起的，幸好有了 MIMO，我们才可以在不消耗更多频谱资源的情况下不断提升峰值速率。

LTE-Advanced 要求系统下行峰值频谱速率为 30bit/s/Hz，上行峰值速率为 15bit/s/Hz，并且希望这时的下行天线配置为 8×8 或者更少，上行天线配置为 4×4 或者更少。更多的天线场景在实际应用中难以碰到，如果只是在实验室实现那就没有太多意义了。

我们接下来来看看，为了提高系统性能，LTE-Advanced 都采取了哪些关键技术。

8.2 让梦想照进现实— LTE-Advanced 关键技术

LTE 相对于 3G 技术而言，名为“演进”，实为“革命”，其空口技术发生了翻天覆地的改变，如 OFDMA、MIMO 技术等。这些技术充分采用了 20 年来信号处理技术的成果，以至于到了 LTE-Advanced 的时候，一时也拿不出什么革命性的技术出来了。

所以 LTE-Advanced 相对 LTE 而言，在空口上没有发生太大的变化，依然沿用了 OFDM 和 MIMO 技术。这样做也有其他的考虑，LTE 本来就带有 4G 技术的特征了，只需要在其基础上进行修改，即可满足 IMT-Advanced 的要求，这个时候进行大的变动，对产业链上已经开始去进行 LTE 的商业运作的合作伙伴是一种打击，不利于 LTE 的产业化和商业部署。

基于这样的考虑，3GPP 规定，LTE-Advanced 系统应支持原来 LTE 的全部功能，并支持与 LTE 的前后向兼容性。也就是说，LTE 的终端可以接入未来的 LTE-Advanced 网络，而 LTE-Advanced 终端也能接入 LTE 系统。我们知道，从 GSM 到 WCDMA，从 WCDMA 到 LTE，都是需要更换终端的，更换终端带来了高昂的成本。而 3GPP 做出前后向都兼容的决定，无疑是在告诉产业链的上下游，可以放心大胆地投入 LTE 的商业运营上去，芯片商你赶紧生产 LTE 的芯片吧，到 4G 时代你这条流水线也不用停下来，运营商你赶紧部署 LTE 网络吧，这可是一张能对接 4G 的网络啊，现在可以领先，未来也不会落伍！

由于高速数据业务大多发生在室内和热点地区，因此 LTE-Advanced 准备重点对室内和热点场景进行优化，为了实现这个目的，它引入了中继站、家庭式基站、分布式天线等多种手段来扩展高频段的覆盖；在系统带宽的支持上，由于 LTE-Advanced 最大支持 100 MHz 的连续频谱很难找到，因此提出了载波聚合（CA，Carrier Aggregation）的概念，LTE-Advanced 的关键技术还包括协同多点、演进型家庭基站、增强型 MIMO、中

继等。

8.2.1 零散的资源能放到一起用吗？— 载波聚合

我们在 8.1 节说了，LTE-Advanced 未来的频段可能高低分布不匀。高频段具有的频谱资源丰富，从而能提供大带宽、高容量的优点，同时它又具有覆盖能力不足、穿透能力差的弱点；低频段具有覆盖能力强、穿透性能好的特点，但同时频谱资源又非常有限，无法提供更多的带宽等缺点。

所以 LTE-Advanced 采取了“多频段层叠建网”的思路，把低频段用于广覆盖，用来给所有用户提供接入服务，用以弥补高频段在覆盖和支持高速移动方面的不足；同时在此基础上用高频段来对室内和热点覆盖，用来弥补低频段在频谱资源上的不足。有时候你可以把它理解为“广域网”和“局域网”的差别，现在中国 3 大运营商的 3G 建设基本都采取了这种模式，即“3G+Wi-Fi”，用 3G 来提供一个广覆盖，保证你能随时随地上网，而在高铁、机场、咖啡厅等热点场所用 Wi-Fi 叠加一个覆盖，由于 Wi-Fi 能提供高达 54Mbit/s 的下行带宽，因此能有效缓解 3G 网络的压力。LTE-Advanced 高频段资源在热点的应用场景和 Wi-Fi 是很相似的，不过能够提供比 Wi-Fi 高得多的性能。

除此之外，在频谱方面 LTE-Advanced 还遇到了别的问题，大家都知道 LTE 中支持的带宽是 20MHz，但是 LTE-Advanced 为了实现更高的峰值速率，需要最大可以支持 100MHz 的带宽。现在很多国家频谱资源都非常紧张，要找出一些 20MHz 的连续带宽已殊为不易，何况 100MHz！很多时候我们会遇到一些不连续的零散频段，中间可能有一些频谱资源已经被分配出去了，面对这种问题，我们该怎么办呢？

为了解决这个问题，LTE-Advanced 采用了载波聚合的方式。所谓载波聚合，其实就是一种资源的整合，其实我们不妨把它类比成单位捐款，现在需要捐款 1 万元，但哪个个人要拿出这么一笔数字都比较困难。怎么办呢？一人捐一点合到一起就解决了。LTE-Advanced 采取的正是这种模式。

在 LTE-Advanced 里，可以用载波聚合来实现连续/不连续频谱的资源整合。载波聚合的时候首先应该考虑将相邻的数个小频带整合为一个较大的频带，这样对于终端而言滤波器需要滤波的频段比较集中，不需要在一个很大的范围内去滤波，这样实现起来比较容易，如图 8.2 所示。如果相邻频段资源不够，那就要考虑去非相邻频段来整合资源了，在这么大跨度内整合资源有一个问题横亘在面前，那就是滤波器，如果这些频段之间间隔很大（很多频段相隔数百兆赫兹），那么对于滤波器而言就比较难实现。

实现载波整合后，LTE 的终端可以接入其中一个载波单元（LTE 的最大带宽为 20MHz，因此这个频谱资源块不超过 20MHz），而 LTE-Advanced 的终端可以接入多个载



波单元，把这些载波单元聚合起来，实现更高的带宽。

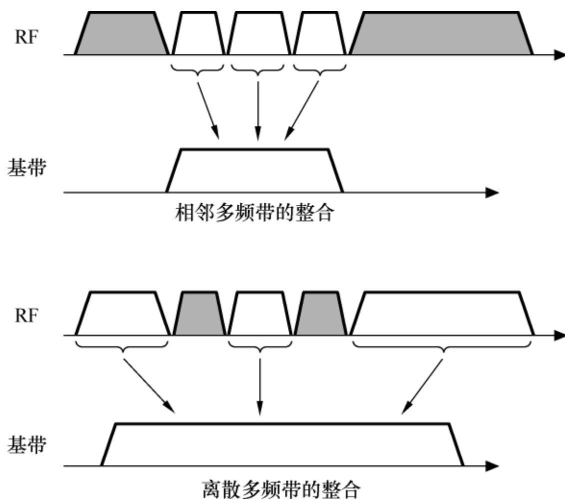


图 8.2　载波聚合

载波聚合的优点十分明显，LTE-Advanced 可以沿用 LTE 的物理信道和调制编码方式，这样标准就不需要有太大的动作，从而实现从 LTE 到 LTE-Advanced 的平滑过渡。

8.2.2　打破部门墙— CoMP

企业一个常见的毛病就是部门墙太厚，出于自己部门绩效的考虑，各个部门各扫门前雪，对于部门之间交叉的工作办起来就效率和质量极其低下。通常认为解决部门墙的办法就是设置一致的目标和 KPI，使得部门之间能够有效协作起来，共同完成工作。

无线通信制式很多时候也是这样，由于比较关注峰值速率，因此当终端在小区边缘的时候基站容易消耗更多的资源去克服衰落带来的影响。LTE 由于很多时候采取的是同频组网，所以小区间干扰比较大，由于小区间干扰往往发生在小区边缘，属于多个基站的覆盖区域，靠单个基站的努力效果比较有限，因此需要多个基站的协作。

为了提高小区边缘性能和系统吞吐量，改善高数据速率带来的干扰问题，LTE-Advanced 引入了一种叫做协同多点（CoMP，Coordinated Multi-Point）传输的技术。

1. 基站间协同

用来进行协同多点传输技术的基站有两种，其中一种就是利用原来的 eNode B 来对用户一起传数据。这种方式会带来一个问题，就是用来进行协作传输的相邻 eNode B 之间需要敷设光纤，原来的相邻 eNode B 之间的 X2 接口是通过 Mesh 相连



的，Mesh 是一种无线组网方式，大家只要理解为原来的 eNode B 之间是通过无线技术对接的即可，由于 Mesh 技术较复杂，在这里不展开讨论。既然是通过无线技术实现基站间互联的，那么大家也想象得到，其所能传输的数据量是有限的，其传输时延也是比较长的。基站之间很难实现数据业务之间的协同，而只能实现控制面的信令交流。

现在基站间通过 RoF（Radio-over-Fiber）光纤直接相连，光纤传输数据的能力大大高于无线的 Mesh 网络。因此，X2 接口可以从一个单纯的控制面接口扩展为一个用户面/控制面综合接口。

除了将现有基站的 X2 口采用光纤互联，扩大其传输能力，从而实现基站间协调传输以外，还有一种方式能实现多点协同通信，那就是采用分布式天线。

2. 分布式天线

分布式天线是一种从“小区分裂”角度来考虑的新型网络架构，其核心思想就是通过插入大量新的站点来拉近天线和用户之间的距离，实现“小区分裂”。这种方式听起来与图 8.3 所采用的方式类似，图 8.3 也是对小区进行分裂了嘛，有 4 个基站，区别在哪里呢？

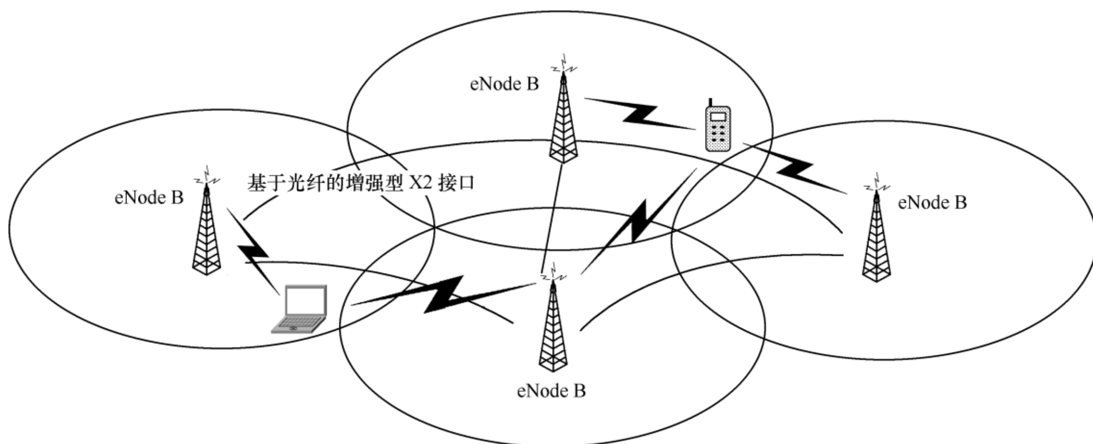


图 8.3　基于现有站点的协同传输

那就是分布式天线新增的天线站只包含射频模块，类似一个无线远端单元（RRU，Radio Remote Unit），而所有的基带处理仍集中在基站，形成集中的基带单元（BBU，BaseBand Unit）。除了“主站点”，其他分站点不再有 BBU，这就是最根本的区别。而 BBU 生成的中频或者射频信号通过 RoF 光纤传送到各个天线站。你不妨把天线站看成基站的多个扇区（因为这些站点本来就没有 BBU），既然是一个基站下的多个扇区，那



么自然进行协同就非常容易。分布式系统的多站点协调如图 8.4 所示。

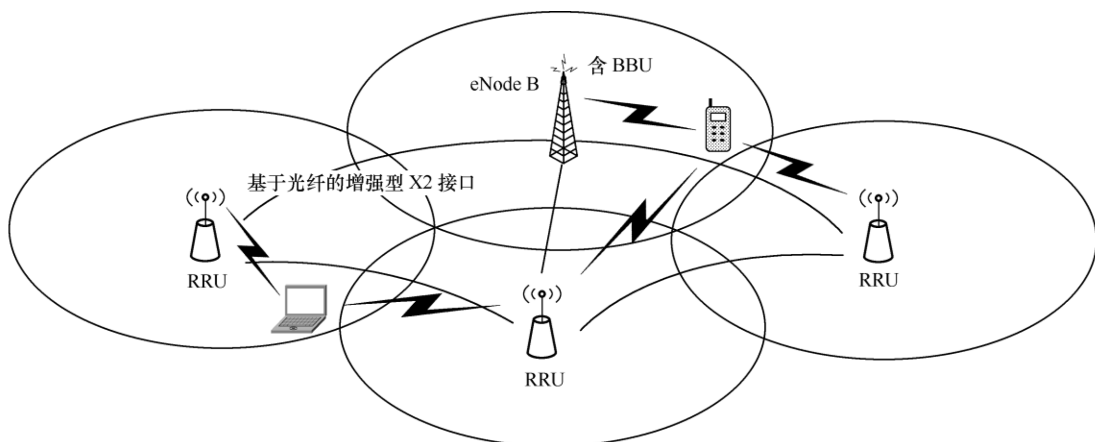


图 8.4　分布式系统的多站点协调

我们在上面知道了，协同多点传输既可以采用现有站点用 RoF 光纤联合起来工作，也可以从现有站点用光纤拉远 RRU 进行覆盖，实现“扇区内”的联合工作。然后，无论是采用 eNode B 也好，采取 RRU 也罢，之间的协作具体是怎么实现的呢？

首先，在 LTE-Advanced 中，CoMP 定义了两个集合，分别是协作集和报告集。协作集指的是直接和间接参与协作发送的节点集合；报告集指的是需要测量其与终端之间链路信道状态信息的小区的集合。LTE-Advanced 的 CoMP 中，传输物理下行控制信道的小区为服务小区，为了和 LTE 兼容，CoMP 中只有一个服务小区。

LTE-Advanced 的 CoMP 可以分为以下两大类。

（1）联合处理（JP，Joint Processing）。

在联合处理中，协作集中的每一个节点都会发送数据，因此数据会存储于协作集的每个节点中。联合处理可以分为两大块内容，也即联合传输（JT，Joint Transmission）和动态小区选择（DCS，Dynamic Cell Selection）

① 联合传输。在联合传输中，可以同时选择协作集中的多个节点为用户进行 PDSCH 的传输，用于提高信号质量，如图 8.5 所示。

② 动态小区选择。在动态小区选择中，一个时刻只能选择协作集中的一个节点为用户进行 PDSCH 传输。可以通过快速灵活地选择小区为用户传输数据来提高系统整体性能。这跟 HSDPA 以及 EV-DO 的调度算法有点神似，在 HSDPA 和 EV-DO 中，同一个基站的小区会在不同的时间段给不同的终端发送数据；而动态小区选择中，不同的基站在不同的时间会给同一个终端发送数据。终端和基站所处的地位在 LTE-Advanced 中相对于 HSDPA 以及 EV-DO 恰好掉了个头。

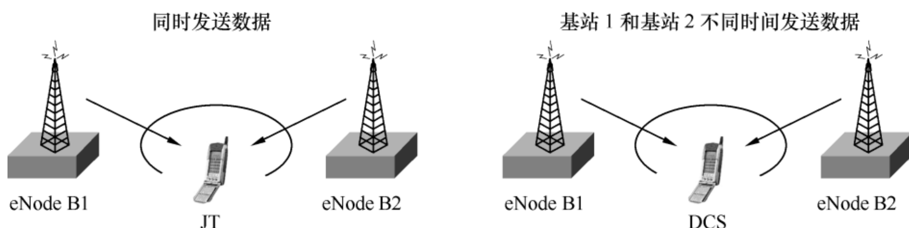


图 8.5　联合处理的两种方式

（2）协作调度/波束赋形（CS/CB）。

在协作调度和波束赋形（CS/CB，Coordinated Scheduling/ Coordinated Beamforming）中，只有服务小区可以进行数据的传输，而 CoMP 的协作集主要负责调度和波束赋形，也就是主要把电磁波的波瓣赋形到不同方向，尽量降低在小区边缘的干扰，如图 8.6 所示，请注意电磁波的指向。

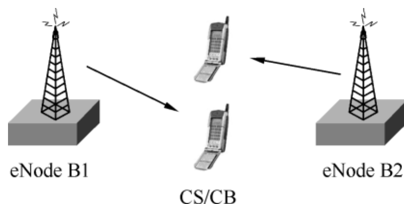


图 8.6　协作调度/波束赋形

我们知道，协同多点传输其根本目的就是解决在小区边缘的干扰问题。除此之外，采用分布式天线方式（即 BBU-RRU 模式），由于 RRU 布放比较灵活，不像建站受制于很多条件，我们还可以通过拉远的 RRU 来解决现网一些覆盖的空洞。

但是我们注意到，无论是采用基站间协作也好，采用 BBU 和 RRU 模式也罢，中间都有一个必要的步骤就是必须采用光纤。但是现网并不是所有地方都有条件利用光纤，如果出于成本的考虑或者限于地形的影响，无法采用光纤，这种地方若有覆盖不好的情况该怎么办呢？

8.2.3　4G 时代的二传手—　中继（Relay）

所谓中继，就是基站不直接将信号发送给终端（没办法，频段这么高，覆盖盲区肯定有一些），而是先发给一个中继站（RS，Relay Station），然后再由中继站发送给终端的技术，如图 8.7 所示。

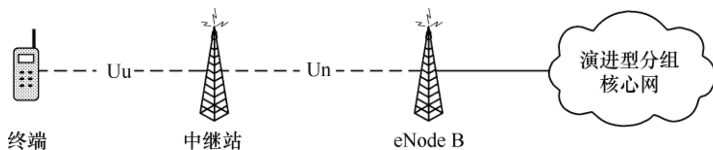


图 8.7　中继

在图 8.7 中，中继通过 Un 接口连接到 eNode B，同时通过 Uu 接口连接到终端，中



继相当于在 eNode B 之间扮演了一个二传手的角色。请注意，图 8.7 中 Un 接口，也即 eNode B 和中继站的接口采取的是无线传输方式，这是与 RRU 光纤拉远方式一个重要的区别。

Relay 是 LTE-Advanced 采取的一项重要技术，一方面，LTE-Advanced 系统提出了很高的系统容量要求；另一方面，可供获得大容量的大带宽频谱可能只能在较高频段获得，而这样高的频段的路径损耗和穿透损耗都比较大，很难实现好的覆盖。比如在图 8.8 所示的场景中，基站的信号到笔记本电脑终端所在区域衰耗已经比较大，那我们就可以在这之间加一个中继，接收信号再放大一次，由于中继可以灵活选择位置，因此可以实现对终端的较好的覆盖。

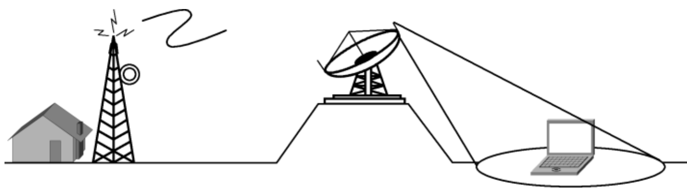


图 8.8　中继应用场景

无论是 RRU 拉远也好，中继也罢，解决的基本都还是较大范围的覆盖问题，如果现在有某个人家里的信号不好，请问该怎么办？传统的方式一般是采用天线方位调整、功率调整、参数调整等方式，但家庭的数量实在是太大了，这种方式只能解决极小一部分，未来如果要实现家庭级别的良好覆盖，必须还得有其他解决方案。

8.2.4　家里也可以布放基站？— femto

我们知道，无论运营商的网络覆盖有多好，要照顾到每一个家庭几乎都是一个不可能完成的任务，因为电磁波的传播实在是太难以控制了，而城市的建筑物也是在不断拔地而起，每一栋大楼的建起都会改变周边的电磁环境，要指望基站都能随之改变，实在是一件很困难的事情。或许是在家庭里开始广泛应用的 Wi-Fi 无线路由器给了 3GPP 以启示。既然有互联网的地方，就可以有 Wi-Fi（用无线路由器把有线宽带信号转成 Wi-Fi 信号），那么有互联网的地方，是不是都可以有 LTE 信号呢？

这是一个令人振奋的想法，因为有线宽带用户正在快速增长，越来越多的家庭用户拥有了固定宽带。如果能够在信号不好有需要改善覆盖的家庭也装这么个即插即用的小基站，而且就像 Wi-Fi 路由器一样便捷，那该有多好。

3GPP 对这种想法很感兴趣，因为 LTE-Advanced 需要很高的带宽，这意味着很多时候需要运行在高频段，因为只有高频段才有丰富的频谱资源给它用。但是高频段对于室

内的信号质量而言不是什么好消息，很多室内信号的质量的改善可能有赖于室内覆盖，但是室内覆盖并不是那么容易建的，而且成本高昂。于是，3GPP 开始推动制定家庭基站的标准的工作，由于 LTE 是全 IP 化的网络，因此家庭基站可以通过 IP 网络来实现信号的回传，而现在的互联网也是基于 IP 的，这就意味着家庭基站可以利用家庭的宽带来把手机信号回传到运营商的机房（如图 8.9 所示），这实在是非常便捷。

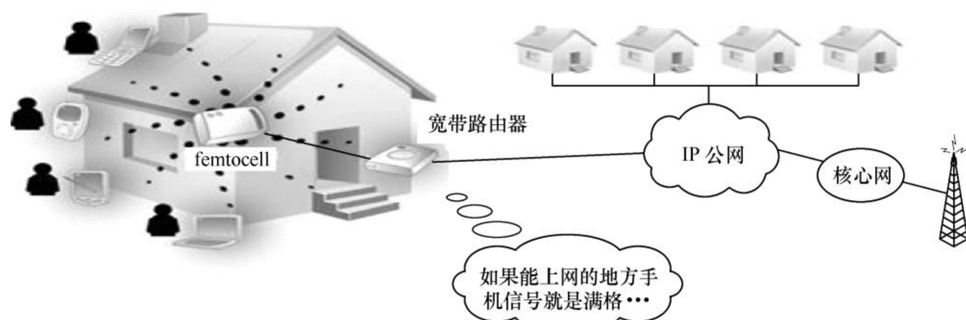


图 8.9　家庭基站的梦想

这种产品很快就开发出来了，大小跟一个 Wi-Fi 路由器差不多，发射功率 10～100mW，也与之很接近。这种家庭基站有一个很好听的名字，叫做“femtocell”，所谓 femto，在英文里的意思是千万亿分之一，也就说明它是一个很小很小的基站，在国内也通常把它叫做“飞蜂窝”，现在 femto 已经不仅仅在 LTE-Advanced 上采用，在 UMTS 上也开始广泛使用，图 8.10 就是一个 UMTS 的 femto。



图 8.10　家庭基站

家庭基站，顾名思义，设备是布放在家庭里面的。由于家庭用户都是非专业用户，你不能指望他们能像专业技术人员一样对基站进行配置和调测。所以这种小基站采用了傻瓜式的操作方法——只要往网线口上一插，接下来就不用管它了，数据的配置、参数的优化都由它自己完成，如图 8.11 所示。

其实这种飞蜂窝不止可以用于家庭，还可以用于西餐厅、KTV、会所等一些装修比较好的高档场所，传统的室分施工对装修会有一定程度的破坏，因此室分进场常常会遇到阻力。而这些场所出于提升档次的需要，通常会采用大量大理石，大理石对信号的阻隔作用非常明显，但这些地方通常都会有宽带，这就为 femto 的进入奠定了良好契机。

一个比较典型的案例发生在上海外滩的某著名银行（如图 8.12 所示），如果参加旅行团游上海，这通常是外滩的一个必去的景点。该大楼是政府指定的历史保护文物，不



同意进行室内覆盖施工。传统的信号覆盖方法都是依靠室外站来覆盖室内，然而该银行装修极为富丽堂皇，用大理石做墙体，室内信号飘忽不定，时有时无。通过用 femto 进行 3G 覆盖，仅一天半就完成了施工，达到了良好的覆盖效果。

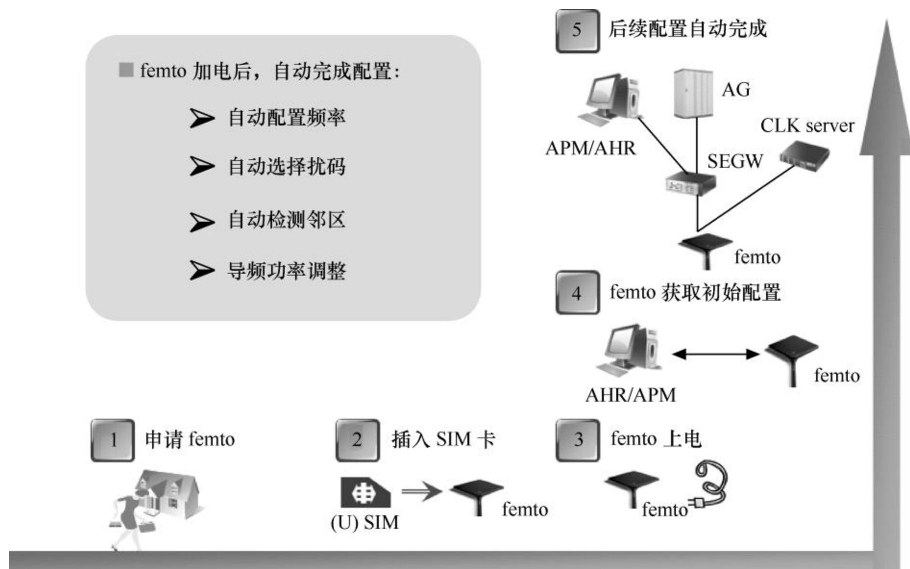


图 8.11　傻瓜式的 femto 基站操作

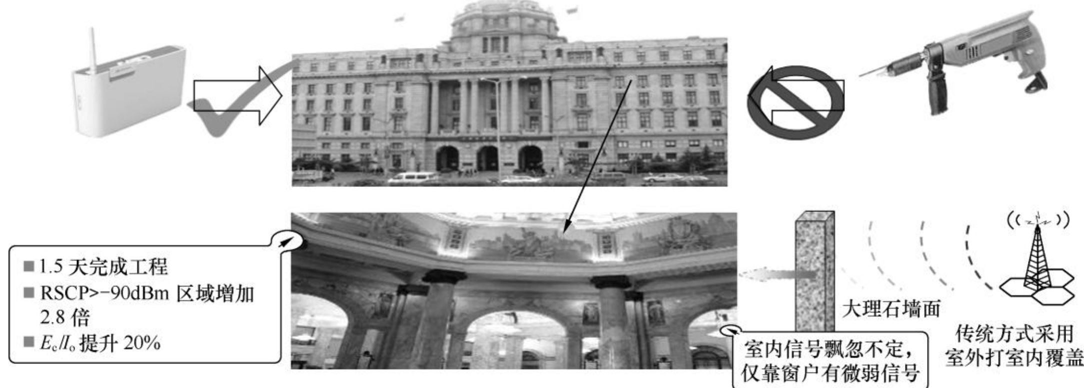


图 8.12　上海外滩浦发银行采取 femto 覆盖

讨论了 femto 的用途之后，我们接下来看看 femto 的网络结构，如图 8.13 所示。

我们看到，为了避免 femto 基站对现在的核心网组织架构造成冲击，从而使得改动可以最小，在 MME/S-GW 这个 LTE-Advanced 的核心网与 eNode B 之间，还横插进来了一个 femto 的核心域，这个核心域的作用就是对 femto 基站进行管理，然后把数据转发

到 LTE-Advanced 的核心网上去。

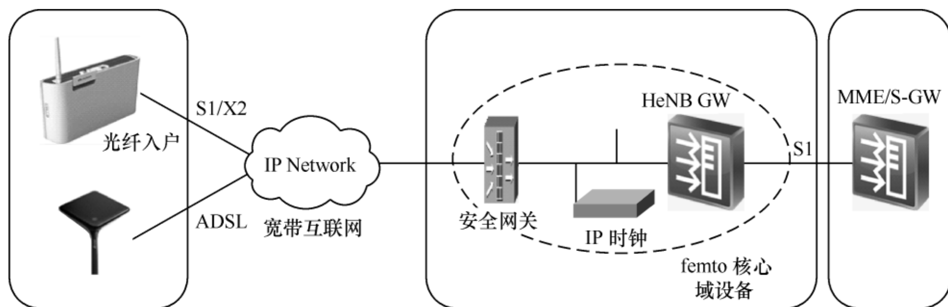


图 8.13　femto 网络结构

对于 femto 基站的介绍我们就到这里，femto 的引入，为 LTE-Advanced 的室内覆盖提供了一个有效的手段，但同时又带来了一个新的问题，就是当基站进入家庭之后，如此庞大数量的 femto 该怎样去管理，该怎样去维护？

8.2.5　网络可以自己规划和优化？— SON 网络

移动网络技术发展迅速，从 2G 到 3G 再到 LTE，在带来更高的数据吞吐率以及网络响应速度的同时，由于 LTE-Advanced 信号处于高频段，相比 2G、3G 信号具有更高的路损和穿透损耗，为保证良好的无线覆盖质量，无线小区数量将比以前更多，尤其是家庭基站（femto）大量使用以后，网络将变得更加庞大。

此外，一家运营商同时运营多代无线网络也对运营成本构成了极大的压力。怎样来降低网络的运营成本，成了 LTE-Advanced 时代必须面对和解决的挑战。

在一般人模糊的印象里，可能以为资本性支出或者说建设成本（CAPEX）是运营商最大的支出，实际上，运营成本（OPEX）在当前运营商总成本中的占比已达到 60%，而其中维护和能耗成本又占到运营成本的 60%，所以尽力降低维护成本，对于运营商而言是一件非常重要的事情。在 LTE-Advanced 时代，由于站点数量的大量增加，如果还要采取当前这种纯人工维护的方式，成本会更加高昂。

除了网络运营成本的挑战，由于宽带无线接入的爆发式增长使得运维和网络复杂度明显提高。传统的以人工经验为主的组网及网优实时性差， 调整粒度粗，出错概率大且人工要求高，将无法适应上述变化。与此同时，从 3G 开始，移动运营商的工作重心就逐步从网络基础设施运维转向网络业务和应用的开发及商业模式的推广，以博取竞争优势及商业收益。因此，如果高效的网络运维主要能由网络自身来实现，将可以帮助运营商减少相关投入，将更多的资金和精力投入到市场竞争中去。

基于这样的背景，3GPP 开始研究自组织网络（SON，Self-Organizing Network），并



将其引入 LTE 和 LTE-Advanced 中。这种网络包含 4 个特点，即网络自配置、网络自优化、网络自愈和网络节能。

关于网络自配置，如果大家装过 Windows 系统，相信对此深有感触。以前装 Windows 的时候，每一步都需要人工操作，填写某些相关数据，非常麻烦，后来出了一个 Ghost 盘之后，把盘插进光驱，只需要一键就能搞定。传统的基站配置需要人工一步步执行，非常复杂，要配置大量数据，比如传输配置、邻区设置、容量和硬件配置等。而 SON 网络可以把这一切工作都集成到网管上，现场只需要配置极少量数据，其他参数都自动从网管上下载，就如 Ghost 安装盘一般简单方便。

网络变得越来越庞大和越来越复杂之后，网络能够自动优化就变得非常重要。对于网络自动优化而言，最重要的又是邻区的自动优化。有过维护和优化经验的人都知道，在网络建设和优化的过程中一个比较耗费人力的工作就是处理邻区关系。在部署了 LTE-Advanced 网络，尤其是部署了家庭型基站 femto 以后，网络会更庞大，邻区关系的优化就会变得更加复杂。由于 LTE-Advanced 无线网络的庞大规模，手动维护邻区关系是一个十分巨大的工程，邻区关系自动优化需求极为迫切。对于 SON 来说，自动邻区关系 ANR（Automatic Neighbor Relation）是最重要的功能之一。ANR 必须支持来自不同厂商的网络设备，因此 ANR 是 SON 功能中最早在 3GPP 组织内得以实施标准化的功能之一。当建立一个新的 eNode B 或者优化邻区列表时，ANR 将会大大减少邻区关系的手动处理，从而能够提高成功切换的数量并且降低由于缺少邻区关系而产生的掉话。降低掉话这一点非常重要，因为掉话是用户最糟糕的通信体验之一，也是 KPI 考核中一项重要的指标。

在 LTE–Advanced，不再通过网管来配置邻区，而是通过终端来自动进行 ANR 的维护，这一点非常特殊。因为 LTE-Advanced 的终端不再需要邻区列表，而是通过终端上报的测量报告来获得邻小区的情况。我们通过图 8.14 和图 8.15 来比较传统的加邻区维护方式和 LTE-Advanced 中的自动邻区关系维护方式。

网络自愈指的是网络自身应能够感知、识别、定位并关联告警，并启动自愈机制消除相应的故障，恢复正常工作状态。

一个传统无线网络的 OPEX（运营支出）中能源消耗占到 30%～40%，是最大的开销项目。而根据测算，这其中 90%的能源消耗都发生在网络没有数据传输的状态下，节能潜力巨大。所谓网络节能，其主要的节能手段就是根据具体网络负荷变化控制无线资源的开闭，在满足用户使用的同时尽量避免网络资源的空转。通俗一点说，就是通过判断负荷的高低来决定开启资源的多少，比如 GSM 里面，现网某小区有 4 个载波，如果打电话的用户多，可能 4 个载波都开启，如果打电话的用户少，就关闭其他 2～3 个载波，从而达到节电的目的。



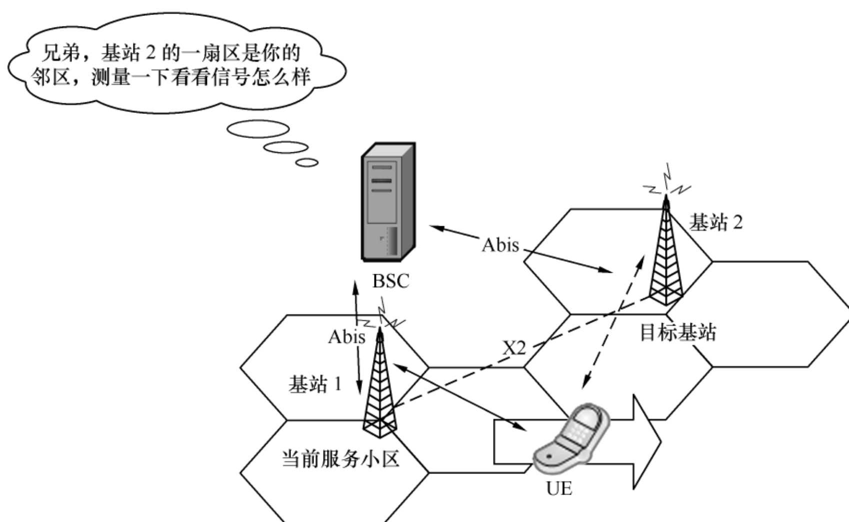


图 8.14　传统的邻区方式

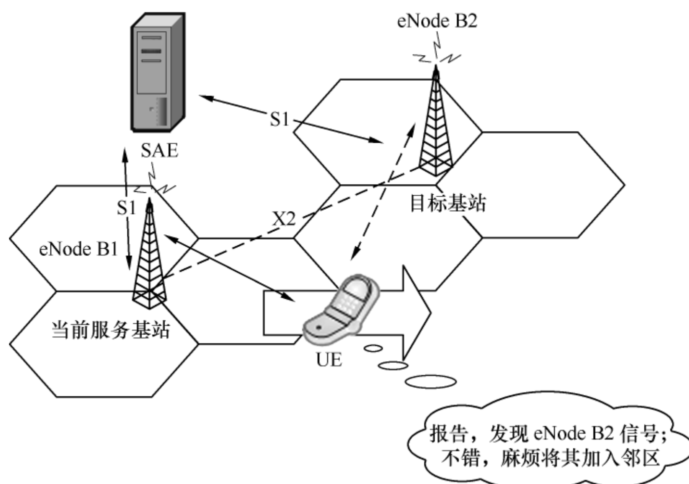


图 8.15　LTE-Advanced 中的 ANR

SON 网络通过自配置、ANR、自愈合、节能等多种方式降低了运营成本，对于运营商而言非常重要。

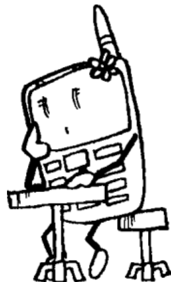
到这里，LTE-Advanced 的概要内容就介绍完了。LTE-Advanced 在制定之初，就提出了很高的目标，下行峰值速率 1Gbit/s，上行峰值速率 500Mbit/s。这样高的速率必定需要很多的频谱资源，由于连续的频谱资源并不多见，LTE-Advanced 采用了多个频段共存的方案，从高频到低频都有，分布很不均衡。由于频谱资源可能比较零散不连续，所以 LTE-Advanced 中开发了载波聚合技术，用以将零散的频谱聚合起来使用；除了关注



上下行峰值速率以外，LTE-Advanced 也很关注处在小区边缘的用户的体验，在这些区域的用户想得到更好的体验，通常靠功率控制的用处并不大，因此可以通过多站点协作传输的方式来取得最佳的效率。除了峰值速率和边缘吞吐率外，由于 LTE-Advanced 多数频谱资源处于高频段，覆盖也是个很大的问题，LTE-Advanced 通过中继（Relay）、RRU 拉远、femto 基站等多种方式来提升覆盖质量。有过建设和维护经验的人都知道，高频段意味多建站，建站数量的增多意味着管理起来非常麻烦，为了降低运维成本，LTE-Advanced 采用了自组织网络（SON），通过自动配置、自动优化、自动故障处理、自动节能来尽最大可能地降低成本。

第 9 章

Chapter 9



通信界的规则制定者— 3GPP

对于接触通信比较少的人来说，本书的有些词汇听起来是不太容易了解其背后所蕴藏的含义的。比如什么 3GPP、3GPP2，还有 R4、R5、R6、…、R9、R10。这些词太抽象，从名字看不出具体的内容，所以也不好记。不像 WCDMA 之类的，把字母拆开一翻译，就知道是“直扩码分多址”，其关键的内容都包含在里面了。幸运的是，这些看起来乱七八糟的词汇可以用一条主线联系起来，那就是两个移动通信制式的标准化。

如同 IT 界的 IEEE 一样，通信界也有这样如同盟会般的机构，比如 3GPP 和 3GPP2，还有 TD-SCDMA 论坛等。由于本书介绍的标准大部分都源于 3GPP，所以拿它作为重点来进行介绍。

9.1 3GPP 组织简介

我们知道，任何组织都是因为一定的目标而组建的。3GPP 成立于 1998 年 12 月，我们不难从 3GPP（The 3rd Generation Partnership Project，第三代合作伙伴计划）的名字中看出，这个组织成立的目的就是开展 IMT-2000，也即 3G 的标准化工作。

这个组织的加盟阵容可谓庞大，有欧洲的 ETSI（European Telecommunicaitons Standards Institute）、日本的 ARIB（Association of Radio Industries and Businesses，无线工业及商贸联合会）和 TTC（Telecommunicaiton Technology Committee，电信技术委员会）、中国的 CCSA（China Communications Standards Association，中国通信标准协会）、美国的 ATIS（The Alliance for Telecommunications Industry Solutions，电信行业解决方案联盟），中国无线通信标准研究所（CWTS）在 1996 年 6 月加入了 3GPP。3GPP 的标志性 LOGO 如图 9.1 所示，颇有点中国水墨丹青的味道。

3GPP 的最初目标是制定基于 GSM 核心网的第三代移动通信技术，同时负责对 GSM



技术进行改进和对 UMTS 进行演进。这个组织 10 来年下来可谓战果丰硕，在 GSM 的分组化演进层面，开发出了 GPRS、EDGE；在 UMTS 层面，制定了 WCDMA、TD-SCDMA 标准及其后续演进版本 HSDPA、HSUPA、HSPA +；为了应对 WiMAX 的竞争，又投入大量人力物力开发出了 LTE 标准。在 2G 层面和 3G 层面，3GPP 的活都干得很漂亮，甚至 LTE 这么一个准 4G 技术，3GPP 也当仁不让地揽成了自己活，还给它冠以“Long Term Evolution”的名字，名为演进，实则革命。



图 9.1　3GPP 的 LOGO

LTE 打了一次擦边球也就罢了，然而，IMT-Advanced 毕竟是正儿八经的 4G 技术，不属于 3GPP 的工作范围。如果不对“革命纲领”进行一下修改，把“开发 4G”技术加进去，对组织上下而言还是有那么一点名不正言不顺。于是，2007 年 7 月，3GPP 正式召开会议，将 3GPP 的工作范围扩大到 IMT-Advanced，并于 2008 年 3 月正式在 3GPP 立项，这个项目的名字就是我们在上一章所说的“LTE-Advanced”。

9.2　3GPP 的组织架构

我们在上面说了，短短 10 来年，3GPP 在无线通信领域制定了大量的标准，做出了大量的成绩，并且在无线通信领域取得了绝对领先的地位。要想把工作干得既有效率又有效果，必定得有一个完善的组织架构和有效的流程，我们接下来就来看看 3GPP 是怎样工作的。

3GPP 其创立之初的目的就是制定 UMTS 标准，然后兼顾 GSM 的演进，这些工作都由技术规范组（TSG，Technical Specification Group）来完成。那么需要几个技术规范组呢？首先，GSM 及其后续演进方向 EDGE 都跟 UMTS 技术标准大大不同，自然需要一个单独的技术规范组，这个组也叫做 TSG GERAN，所谓 GERAN，也就是 GSM/EDGE 的无线接入网的意思。UMTS 的工作内容比较多，需要两个工作组，一个负责无线接入网，叫做 TSG RAN；另一个负责核心网和终端，叫做 TSG CT，CT 是 Core(核心网)和 Terminal（终端）的意思。除此之外，还有一些共性的内容由一个单独的技术规范组来完成，比如业务、安全、电信网络管理等，由 TSG SA（Services and System Aspects，业务与系统方面）来负责。所以一共分为 4 个 TSG。

当然，这么 4 大块组织，其内容一定会有交叉重叠的地方，也一定会有需要互相协作的地方。这就需要一个项目协调组（PCG，Project Co-ordination Group）来调动资源，

项目协调组不负责具体的工作，主要是进行沟通和协调。

在技术规范组之下，又有3～5个不等的工作组（WG，Work Group），这些工作组是具体干活的，大家可以通过图9.2看看具体都有哪些工作小组，在这里就不一一列举了。

其实我们也可以把3GPP看成是一个公司，那么其组织架构还有颇多相似之处。此时TSG就相当于一个部门，部门下面通常会分设中心和小组。部门之间的沟通协作是比较难做的，通常也称作“部门墙”。要打破部门墙，就要有更高一级的组织或个人来负责横向的沟通工作，确保工作顺利完成。3GPP完整的组织架构如图9.2所示。

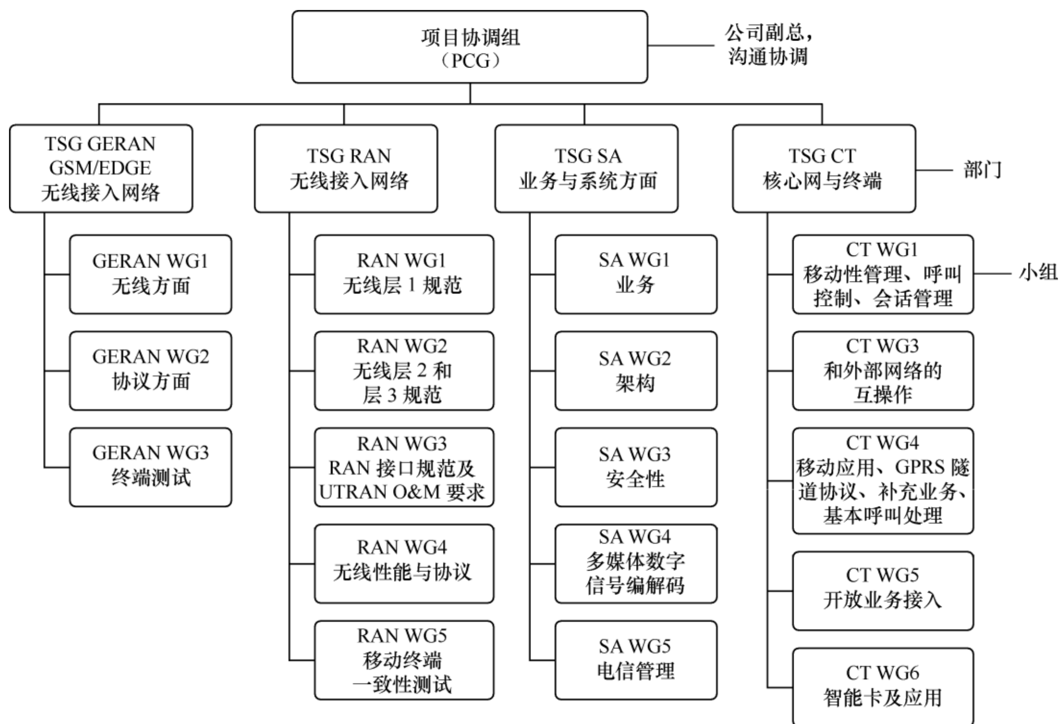


图9.2　3GPP组织结构

9.3 在PK与妥协中前行— 3GPP协议

在3GPP组织中，通常的决策机构是TSG，而PCG一如其名字一般，真的不负责具体的技术，只是来做协调管理工作的。

这个组织和很多公司一样，喜欢通过开会来解决问题，不过频率比较低，不像一些公司三天两头总是开会。3GPP每个TSG一般每年开4次会，每个WG一年也是开4次



会。当然，TSG 作为 WG 的上级机构，它开的会的名字自然不一样，要威风得多，叫做“全会（plenary）”。所谓全会，也就是把下面 WG 的一干干活的人都凑齐全了的会。

把这么多通信精英召集在一起，自然要决定一些重要的事情。没错，TSG 全会上决定的事情非常重要，那就是决定对哪个项目进行研究和标准化。如果它觉得哪项技术有前途，比如 MIMO，就可以决定对其进行研究，研究项目也被称作研究阶段（SI，Study Item），研究阶段只输出研究报告（TR，Technical Report）；如果觉得这项技术确实不错，需要把它标准化，加入 3GPP 协议中来，就可以对其设立标准化项目，标准化项目也被称为工作阶段（WI，Work Item），工作阶段就可以输出正式的技术规范（TS，Technical Specification）。通常一个重要的议题会先经过 SI 阶段的研究，然后再进入 WI 阶段的标准化制定工作。TR 和 TS 均采用 5 位编号，即 TR xx.yyy、TS xx.yyy，每个 TR 或 TS 都有唯一的编号。其中 xx 为规范的系列号，通常相同领域 TR 和 TS 会集中放在一个系列中，如 3G 系统的无线接入网就都放在 25.yyy 系列中，而 LTE 无线接入网的规范则放在 35.yyy 系列中，通常这个 25 和 35 系列也是搞无线的人读得最多的系列。

如果说 TSG 的主要工作就是决定大方向，设立 SI 和 WI 的话，那么 SI 和 WI 里面具体的技术规范细节就有赖于下面的工作组 WG 来完成。要制定一项技术标准不是一件容易的事情，通常一种技术标准会有多个技术方案摆上台来 PK，当所有 WG 成员公司都同意一个技术方案时，该方案就会被通过。有可能马上加入现在起草的 TR/TS 中，也可能以会议记录的方式纳入今后的规划。问题是某个方案通过并不是那么容易的，我们知道，3GPP 的组织成员来自五湖四海，代表不同的公司，乃至不同的国家，因此这些组织成员提出的技术方案的背后都代表着它们自身的利益，在 PK 过程中出现各执一词的情况也很正常，这就需要一个争端解决机制。

通常，面对争论，WG 工作组采取的是“真理越辩越明”的处理方式，也就是对这个问题继续深入研究。等研究越来越深入，问题越来越明朗，那么一般就会有越来越多的公司会倾向支持某一个更为合理的方案。少数派一看风向不对，可能就会让步。由于 3GPP 参与的成员组织足够多，不怕被某一家把持住话语权，所以这种方式通常还比较有效。

如果即使如此各方还是各执一词，僵持不下的话，WG 就不得已可能要采取投票的方式来对方案进行取舍了。但是 3GPP 对投票的态度是非常谨慎的，毕竟大家都是行业精英嘛，会议桌上谈不成非要用你一票我一票来场 PK，大家面子上也不好看。所以 3GPP 就创新般地发明了一种“示意投票”的方法，通过这种方式来揭示各技术方案背后支持阵容的大小强弱，然后通过这种方式告诉少数派“兄弟，大家都是那个意见，你一定要保留这个意见也可以，但是真投票也会是这个结果，我怕你待会投票的时候面子上过不去”。绝大部分情况下，讨论和“示意性”投票就能解决争执，不会非要到正式投票。

讨论完了之后，每个 SI/WI 都会有一个项目管理人，负责监控该 SI/WI 的进展，然后用于向 TSG 全会汇报。通常，WG 工作一段时间后就会向 TSG 全会汇报该 SI/WI 的进展情况，以便 TSG 对这些 WI/SI 项目进行管理。

协议生成以后，通常都会挂在 3GPP 的官网上。如果大家想查找某一系列的协议来看，最方便的方式就是到 3GPP 的网站上去下载（如图 9.3 所示）。

http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/

收藏夹 Index of /ftp/Specs/archive/25_series

Index of /ftp/Specs/archive/25_series

Name	Last modified	Size	Descript
Parent Directory		-	
25.05U/	02-Sep-2003 09:43	-	
25.101/	21-Jun-2011 12:20	-	
25.102/	21-Jun-2011 12:20	-	
25.103/	08-Oct-2001 14:34	-	
25.104/	21-Jun-2011 15:49	-	
25.105/	21-Jun-2011 12:20	-	
25.106/	12-Apr-2011 09:09	-	
25.10U/	02-Sep-2003 09:43	-	
25.111/	12-Apr-2011 09:09	-	
25.113/	21-Jun-2011 12:20	-	
25.116/	04-Apr-2010 12:53	-	
25.123/	21-Jun-2011 12:20	-	
25.133/	21-Jun-2011 12:20	-	
25.141/	21-Jun-2011 12:20	-	

图 9.3　3GPP 的 UMTS 的 RAN 侧（25 系列）

9.4 无线通信中的那些足迹—　3GPP 各版本浅析

WCDMA、LTE 可谓是一个版本繁多的制式，偏偏它还是主流制式。所以，什么 R99、R5、R6、R7、R8 都还属于通信里的流行词汇。如果不搞清楚这些版本之间的关系，看起无线通信相关的书籍还真令人头痛。

3GPP 为什么要搞这么多版本呢？就用一套版本不断滚动开发不好吗？这是因为 3GPP 对技术规范采取了比较严格的版本管理，这主要是为了保证设备厂商能够根据一套相对稳定的技术规范来开发设备。

就像制作桌子一样，不能今天你告诉我标准的长度是高 0.5m、长 1.5m，明天又告诉我高改成 0.4m、长改成 1.6m 了。如果要改的话，应该采取这种方式：在 2002 年邀请各方充分讨论桌子的长宽高该是多少，形成一系列技术规范“TS xx.yyy”，等细节基本



敲定了，在 2003 年宣布规范就这么定了，版本冻结了，生成一个“桌子标准之 R99 版本”，请各个厂家都按这个标准做，这样彼此之间才能兼容；这个版本冻结之后，可以开始下一个版本的标准制定，同时告诉各个厂家，我下一个版本预期什么时候出来，到时候你们可以再更换标准，并且要拍胸脯让各厂家放心，虽然技术标准修改了，但是下一个版本的抽屉和这个版本的抽屉一定是可以互相使用的，绝对是兼容的，否则各厂家开发众多模具，到下一版本都不能用，一定拿砖头拍死你丫的。

我们接下来就看看 3GPP 一路走来的各个版本。

1. R99 版本

这算是一个里程碑般的版本，因为它是 UMTS 的第一个正式版本，后续版本都要与它兼容。3GPP R99 版本的主要特征是继承了 GSM/GPRS 的核心网，这很重要，因为如果连 GSM/GPRS 的核心网都不继承，它就没有足够的噱头号称“平滑演进”。但是空口是没法继承的，GPRS 那乌龟般的上网速率实在令人难以忍受，必须在空口做出革命性的改变。于是，它在空口引进了宽带 CDMA 技术，即 WCDMA，并采用了 CDMA 的一系列关键技术，比如功率控制、软切换什么的。R99 的下行峰值速率理论上可以达到 2Mbit/s，实际上一般宣称最大 384kbit/s。正是这个 384kbit/s 让刚刚呱呱落地的 WCDMA 备受质疑，384kbit/s 也就是 GPRS 峰值速率的 2 倍，不过是乌龟速度的加强版而已，有啥用处？因此当时 3G 无用论、3G 过渡论、4G 上马拯救论都甚嚣尘上，很多人乃至公司根本就不看好 3G 的前景，像著名的北电公司干脆就没有研发 WCDMA 设备。

在核心网侧，WCDMA 在电路域基本上沿用了 GSM 的结构，而在分组域核心网上，也基本沿用了 GPRS 的设备——SGSN 和 GGSN。但相对 GPRS 而言，增加了 QoS 的观念，提高了分组域业务质量的保证能力。

2. R4 版本

R4 版本在空中接口上没有太多的变化，但是这个版本对于中国而言却有划时代的意义，因为 TD-SCDMA 正是在这个版本里被 3GPP 所接纳，中国人在通信世界的版图上，终于有了一片自己的天地。

虽然 R4 版本在 WCDMA 的空口上没有什么作为，但在核心网上动的手术可不小。正是在一版本引入了一个流行的思想，即控制与承载分离。

所谓控制层，就是负责控制呼叫的建立、进程的管理和计费等相关功能的；所谓承载层，就是用来传输数据的。控制面的数据由 MSC Server 来承载，而用户面（即承载层）的信息由 MGW（Media GateWay）来承载。通常而言，用户面的数据流量（话音、数据）



等要远大于控制面的数据流量（信令）等，所以 MSC Server 的个数可以远小于 MGW 的个数，一套 MSC Server 可以和多个 MGW 相连。

由于控制和承载是分离的，可以走不同的通道，所以 MSC Server 和 MGW 也可以分开放置。比如在中国的几大运营商，通常是放一套 MSC 在省公司，信令都通过这里走；然后在每个地市放几套 MGW，因为话音和数据都在地市这边，MGW 靠近 RNC 放，就可以节省大量传输资源。除此之外，还有别的好处，那就是因为 MSC Server 承载的是进程、信令这些东西，这些内容一直在不断地更新和优化，所以版本升级也比较多，而 MGW 的变化要相对小得多，通过 MSC Server 和 MGW 的分离，大量的升级调试都只需要发生在 MSC Server，MGW 的调整就会少很多，从而大大提高运维效率。

控制和承载分离就好比买火车票一样，以前买火车票都需要去火车站排队，后来觉得这样太没有效率了，买火车票跟坐火车不一定要发生在同一个地方啊，这样就把火车票的业务剥离出来了，可以通过网上预订、代售点购买等，分离之后可以大大提高效率。

3. R5 版本

这个版本对于 WCDMA 而言是一个革命性的版本，之前的版本在网上已经有不少运营商在用了。但是由于 3G 标志性的东西，也就是数据业务的下载速率实在是很慢，所以运营的效果并不好，在日本 WCDMA 用户数一度被 cdma2000 用户数所超越，业界对 cdma2000 的赞扬和对 WCDMA 的批评不绝于耳。这这种情况下，WCDMA 势必要有所改变，转折点的到来并没有让大家等多久，HSDPA 就在这种背景下悄然诞生了。

HSDPA 的核心思想也就两点，第一点是共享，扩频码被分成了 15 份，根据用户的情况动态进行分配；第二点是自适应，可以根据信道质量来选择编码方式和调制方式。通过这两种关键技术，HSDPA 其峰值速率可以达到 14.4Mbit/s。相比 384kbit/s，这是一个很大的飞跃，也为未来 WCDMA 的发展奠定了重要的基础。

在 R5 版本，还引入了全 IP 的概念，无论是接入网也好，核心网也罢，所有业务全部由 IP 来承载。这个时候 3GPP2 也不甘寂寞，在核心网的 Release 2 和 Release 3 版本中分别实现了部分 IP 和全 IP。全 IP 化这一点非常重要，因为随着互联网的流行，大家都看得很清楚，未来的网络必定都是属于 IP 的，而且 IT（信息技术）和 CT（通信技术）也是必定要融合的，所以一个全 IP 的网络对于未来非常重要。随后 ICT 产业的融合和 WiMAX 对于 3GPP 的挑战都印证了这个判断，如果面对 WiMAX 的时候 3GPP 还是用的与时代潮流已经格格不入的 TDM 网络，那么 LTE 和 WiMAX 到底鹿死谁手



还真不好说。

与此同时，R5 在核心网侧又引进了 IMS（IP Multimedia Subsystem，IP 多媒体子系统）。这可以说是引入全 IP 后的一个必然结果。传统的 IP 技术一个显著的特点就是“尽力而为”，难以保证传输质量，同时 IP 又是一个开放的网络，在数据传输的安全性和计费控制方面，显得有点力不从心。而采用 IMS，通过基于 IP 的 SIP 技术，能够提供电信级的 QoS 保证，以及对业务进行灵活有效的计费，这就弥补了 IP 本身的不足。

4. R6 版本

虽说 R5 版本将下行峰值速率提高到了一个新的数量级，但是上行依然没有改变。在互联网的“Web1.0 时代”，这样做并没有什么太大的问题，大家上网无非看看新闻，下载点软件。随着“Web2.0 时代”的到来，这种模式受到了挑战，因为“Web2.0 时代”的典型特征就是强调分享，越来越多的人成为传递信息的主体，而不仅仅是接收信息。比如说很多人上 Facebook、优酷、土豆、微博，在上面大量上传照片和视频，这使得上行流量大大提升。因此 R6 在上行方向开发了 HSUPA 技术，通过扩频因子的并码传输方案和自适应编码技术将上行峰值速率提升到 5.76Mbit/s。

与此同时，由于各个国家的频段分配方式并不一致，并不是所有国家都把 2.1GHz 频段留给了 UMTS。为了将 UMTS 的光芒洒向全世界，3GPP 决定“把 UMTS 理论和当地实践相结合”，开始支持各个频段的 UMTS，比如 850MHz、800MHz、1.7GHz，好让每个国家都能用上 UMTS。不过光分配频段还不行，还得对协议的部分内容进行修改，比如应该增加终端在不同频率之间进行测量的内容，如果不进行测量，那跨频段之间的切换也就无法展开了。

考虑到 Wi-Fi 业务正在如火如荼地发展，而 Wi-Fi 业务可以应用在热点，从而降低 UMTS 在热点区域的负荷，可以是 UMTS 建网的很好的补充。因此 3GPP 又增加了与 Wi-Fi 技术的互通。用户在通过 Wi-Fi 接入的时候可以与 UMTS 用户一样使用移动网，包括统一的鉴权和计费，以及移动网提供的一些 PS 域的业务。这个主意很受运营商欢迎，因为 Wi-Fi 的成本并不高，又可以通过它来降低 UMTS 无线网的负荷，移动的“TD + Wi-Fi”战略、联通的“WCDMA + Wi-Fi”战略、都得益于 3GPP 的这个动作。

随着智能终端的普及，可以想象得到人们不会只满足于在手机上看看网页、发发微博，在无聊的时候，一定还想看看手机电视，点播一些感兴趣的视频。于是 R5 就提出了多媒体广播和多播业务（MBMS，Multimedia Broadcast Multicast Service），其主要作用就是支持视频点播业务，应当说 WCDMA 本来就支持这种业务，但是 WCDMA 的信道是专用的，3GPP 觉得像视频和手机电视这种玩意，当用户数上去了之后，一个小区

肯定不止一个人在看，与其给每一个用户分配一条专用的信道倒不如给每个看相同内容的用户分配共享的信道，这样要来得更划算。

但是目前中国有自己的手机多媒体标准，叫做 CMMB（China Mobile Multimedia Broadcasting，中国移动多媒体广播），请注意此“中国移动多媒体广播”非彼“中国移动通信”，这个 CMMB 是属于广电体系的，而中国移动是属于电信体系的。由于广电体系和电信体系一直为到底应该采用 MBMS 作为标准还是 CMMB 作为标准争论不休，因此 MBMS 在中国暂时还未能得到应用，目前中国联通也有手机电视业务，但是这个手机电视并不是走的共享的信道，而是走的传统的专用数据信道，也就是说，跟上网没什么两样。

5. R7 版本

最初对 R7 版本立项之时，WiMAX 已经浮出水面了，3GPP 感受到了这个潜在对手的威胁，所以 3GPP 集中精力对 LTE 进行可行性研究，与此同时，为了保证 UMTS 网络的长期竞争力，对 HSPA 演进的研究也一直没有停止。

首先是想办法提升 HSPA 的速率，演进到 HSPA +。最先想到的是采用更高阶的调制，在 HSDPA 时代，16QAM 就到头了，如果采用 64QAM 调制，那么下行速率马上就可以增加 1.5 倍。其缘由如图 9.4 所示，16QAM 中一个点位对应 4 个比特，而 64QAM 中 1 个点位对应 6 个比特，因此效率可以提升 6/4 = 1.5 倍。除此之外，还在 HSDPA 中引入 MIMO 技术，采用 2 × 2 天线就可以使得下行速率提升一倍。

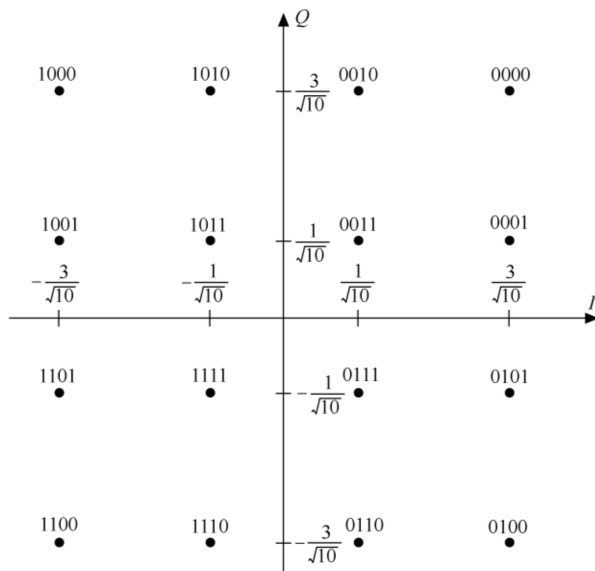


图 9.4　16AQM 与 64QAM



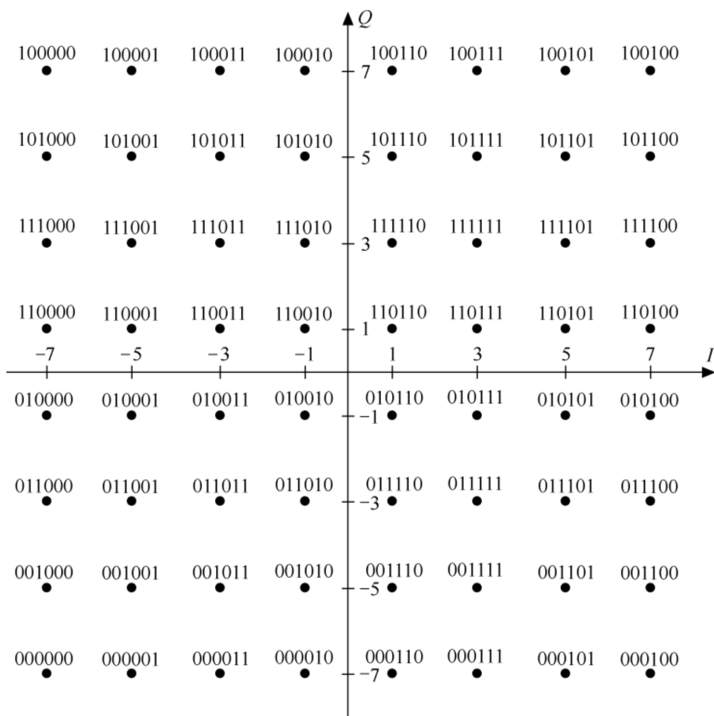


图 9.4　16AQM 与 64QAM（续）

我们不难算出采用 64QAM 对于下行速率提升的程度，14.4Mbit/s × 1.5 = 21.6Mbit/s。2009 年 3 月，香港 CSL 网络发布的 HSPA+就是采用 64QAM 技术，下行速率对外宣称 21Mbit/s。

除此之外，对于 LTE 的可行性研究也一直在紧锣密鼓地进行。

6. R8 版本

这又是一个标志性的版本，因为在 R8 中开展了两项非常重要的演进标准化目标——3G 长期演进（LTE）和 3G 系统架构演进（SAE）。

除此之外，还进行了 Home NodeB（家庭基站，也即我们第 8 章中所说的 femto）和自组织网络（SON）的研究。

此外，还研究了与 3GPP2 以及移动 WiMAX 之间改进的移动性控制。

在 HSDPA 中，开始将 MIMO 和 64QAM 一起使用，这样下行峰值速率可以提高 1.5 × 2 = 3 倍。我们知道，HSDPA 的峰值速率是 14.4Mbit/s，那么同时开通 64QAM 高阶调制和 MIMO 就可以将下行速率提升至 14.4Mbit/s × 2 × 1.5 = 43.2Mbit/s。

2010 年 11 月，香港运营商 CSL 通过 64QAM + MIMO 技术升级其网络，对外宣称

网络支持最高速率 42Mbit/s。

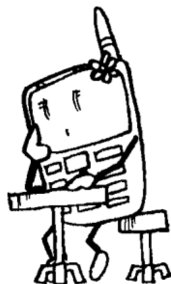
7. R9 版本

也就是我们俗称的 LTE-Advanced 网络，LTE-Advanced 的一些主要内容已经在上一章里讲过，就不在这里赘述了。

到这里为止我们就简单介绍完了 3GPP 的组织架构、工作方式及 3GPP 从 R99 到 R9 各个版本的内容简介。对于 3GPP 的组织和流程，大家略略知道一点即可。对于 3GPP 各个版本协议的一些特点，还是要熟读记牢，因为这些内容在工作中会经常遇到。

第 10 章

Chapter 10



初识网规网优

在前面的 9 章里，我们一直介绍的是移动通信的标准。按标准制作出来的叫做产品，对于世界上的绝大多数产品而言，后续的步骤一般只有两步，即“安装调测”和后期的“维修”，对于复杂一点的产品比如说汽车之类的或许可以叫做“维护”，因为除了做检修还需要做保养之类的。

无线通信的产品可以算是一个异类，它除了需要“安装调测”和“维护”之外，还需要再增加两个步骤，即在安装调测之前的“网络规划”和安装调测之后的“网络优化”。也就是说，无线通信设备的售后过程一般包含“网络规划—安装调测—网络优化—设备维护”等环节，其复杂程度往往远远高于其他产品。

在这个产品售后的长链条的每个环节中，往往都有不同的参与主体，一般而言是这样划分的：“网络规划——设计院”、“安装调测——设备厂家的外包合作方”、“网络优化——设备厂家或第三方”、“设备维护——设备厂家”，请注意的是，这 4 个环节和运营商都是紧密相关的，都有运营商的人深度参与。

我们下面来具体阐述一下这个利益链条是如何运作的，为什么要这样运作。对于刚刚进入通信大门的学子或者试图进入这个行业的人而言，这些内容或许非常重要。

对于无线通信而言，网络规划的主要工作就是根据当前网络的状况及对未来几年业务发展的预测，来判断需要安装多少基站、配置多少载频和功能软件。以及这些基站具体分布在哪里，天线的高度和方位如何。网络规划的工作一般而言由设计院来承担，其盈利模式就是在总投资里按固定的比例进行抽成，比如 3%，作为设计费。网规对人的要求相对而言比较高，所以薪水还比较可观。其实网规的工作设备商也可以做，而且在有些地方的有些项目（比如说交钥匙工程）确实是由设备商来承担的，不过一般而言都会交给设计院来做。其中的道理不难明白，因为设备商是产品的提供方，如果由他们来做设计的话，岂不是基站设备越多越好？所以需要引进设计院加以制衡。

安装调测是整个售后服务中技术含量相对较低的工作，而且有标准化的作业流程可



循，按照步骤来操作变数很小，操作方法容易掌握，所以往往被设备厂商外包出去给第三方。这个工作相对比较简单，所以薪水也没有那么高。

网优在通信行业里算得上一个高薪的职位，同时网优人才也长期处于短缺状态。因为网优是一件相当复杂的工作，需要对设备、参数、信令流程非常熟悉才可以胜任，有时候甚至需要熟悉当地的地形地貌。同时，网优的技能往往不能光靠学习，需要一个项目一个项目的进行经验积累，经验比知识来得还更重要。除此之外，网优工作的流动性非常大，一个地方的网优项目做完了，就需要到另一个地方去，出差非常之多，这一块也需要给予必要的经济补偿。由于网优工作需要掌握相当的技能，积累相当的经验，同时还要承受长期出差带来的不便，这几点使得网优工作成了一个高薪职业。在国内，有很多家大小不等的第三方网优公司，承接各地运营商的优化项目。但现在，设备商开始越来越多地渗入这个领域，设备商相对第三方网优公司而言更了解自己的设备，也可以得到自己公司研发体系的支持，借此优势，设备商在这一块正在赢得越来越多的份额。

设备的维护工作相对网优而言要简单一点，流动性也比网优小得多。因为设备出问题都是突发性的，需要迅速处理，否则就会造成重大影响和经济损失，所以设备维护人员一般都是比较稳定地常驻在某个地方，负责设备日常的维护和关键时候的故障处理。

以上 4 点是整个售后服务环节的工作，通常拆解为几部分然后由不同类型的公司来完成。但是这几年开始出现一个趋势，几家主要的设备商，比如爱立信、华为、诺基亚西门子都开始从单纯的卖设备向设备和服务销售并重，并逐步扩大服务销售在整个销售额中的比例。这是因为服务能让运营商产生依赖性，假设一个地方的网规网优、维护都是由你来做，队伍都已经和运营商整体耦合，配合得很好，那么新购设备通常也会优先考虑你，因为买别家的设备又要和别家的人来进行磨合，很费事。设备商通过进一步向下游的服务进行渗透，和运营商形成更紧密的战略合作，从而可以达到屏蔽竞争对手的目的。

在本章里，我们主要来初步介绍一下网规网优。就运营商的市场人员而言，网优网优的质量直接关系着最终用户的感知（比如单通、掉话、串音等），所以有必要了解一下网规网优的基本知识，看懂一些最关键的反映网络质量的指标数据（接通率、掉话率、上下行平均下载速率），这样不但可以和后台的运维人员更好地沟通，也有利于因地制宜地制定更好的营销政策；对于设备商方面的人员而言，网络的性能就是运营商客户最关心的东西，所以只要你跟客户打交道，不管你是纯销售也好，售前技术支持、研发也罢，虽然不需要做网规网优的动作，但是还是应该懂一点网规网优的内容，这样和客户交流的时候可以更好地理解客户当前网络的问题在哪里，关注的点在哪里。对于设计院、第三方网优公司、设备商里网规网优相关人员，如果是刚入门，也不妨翻看一下，可以快速有一个整体的概念。



接下来，就让我们正式进入网规网优的内容，在网规网优里，有几个词汇是经常要碰到的。第一个词，也就是最关键的词就是“覆盖”，这不难理解，没有覆盖，信号都没有，还谈何优化；第二个词，提得最多的往往是“掉话率”，掉话对用户而言是一种感知非常差的通信行为，试想，你正在谈生意或者跟女朋友说悄悄话，这电话突然“滴答滴”就断了，甚至悄无声息就断了，那得多扫兴，多影响心情啊，这个词排行第二大家应该感同身受；第三个词叫做“接通率”，具体现象就是打别人的电话，电话里告诉你“您拨打的号码暂时无法接通”，对用户而言这也是一种糟糕的体验，不过比掉话而言又好一点，起码通话还没有开始，受的影响没有那么大。除这几个之外，还有什么干扰啊、单通啊、串音之类的，但相比上述几个问题，都不是最关键的。

10.1　一个永恒的话题—　基站能覆盖多远

网优人员也好，运维人员也罢，被人问的最多的一个问题恐怕都是——一个基站究竟能够覆盖多大的地方？对于这个问题，不同的人可能有不同的关心角度。运营商地市的总经理可能关心它，因为他要根据业务的发展情况，估算在某个区域的投资，他可能要考虑：在这个区域的投资能够建设多少个基站，覆盖率能达到多少，能够支持市场的推进么；网络建设和运行维护的经理也可能关心它，因为在某个区域，或许就有那么一片覆盖空白，要解决这个问题，究竟需要建几个基站呢；或者一个对网络什么都不懂，仅仅对它有一点点兴趣的路人甲或者路人乙也可能问起你这个问题，这也并不奇怪，因为我们这行在媒体上曝光率最高的词汇无非就是“基站”、“辐射”之流，问你辐射你或许答不上来或者不愿意回答，那剩下可以聊的就只剩下基站的覆盖了。

悲哀的是，这个问题几乎永远没有标准答案，是典型的 1 000 个人眼里就有 1 000 个哈姆雷特的情况。不管你咨询资深网优人员也好，咨询技术专家也罢，你得到的答案都会是林林总总，五花八门。有人说一个基站可以覆盖 500 米，也有人说一个基站可以覆盖 10 千米，如果你耐心问更多人，还会得到更多的答案。

出现这样的局面也并不奇怪，因为决定基站能覆盖多少距离的因素太多了，以至于随便哪个答案你都不能说不对。这些因素里面还有很多是不可控因素，比如作者就亲眼见过一份网优报告，在这份网优报告里面是如此陈述某一天某些原本没有什么问题的区域是如何突然打不了电话的，其结论是“受到了太阳黑子的影响！”。Oh My God，我们又不是上帝，哪里管得了太阳的运动。因此在本节里，我们所要做的也不是给这个问题一个确切的答案，而是搞清楚哪些主要因素会对信号的传播造成衰减，衰减一大，覆盖范围就会变小，

衰减一小，覆盖范围就会变大。定量的工作需要精心的测量、专业的工具，更恐怖的是还需要复杂的数学公式，这可不是本书的目的。本书倡导的是简单，如果可能，就尽量不要去招惹欧拉、傅里叶、麦克斯韦，但是在本节里，我们依然会用到公式，当然不是由数学家们在实验室里一笔一画推算出来的公式，而是实干家们经过大量的实地测试，一点一滴累积起来的经验公式。即使如此，作者依然不打算用这些公式去计算什么覆盖半径之类的，虽然一些经典通信书籍告诉我们这些公式确实可以拿来进行计算，但是这样过于复杂。对于运营商和设备商的大多数人而言，我们所需要知道的只不过是哪些因素会影响覆盖，如果覆盖情况不好，我们可以通过调整哪些东西来达到覆盖变好的目的就够了。当然要达到这个目的，公式也有它的作用，那就是公式把这些主要的因素都罗列了上去，清晰明了，便于学习，这样你不拿着笔上去算具体的结果，公式还是比较可爱的。

我们从高中的物理课上就可以知道，要想得到什么公式，首先就得建立某种模型，模型的作用是提供一种理想化的环境，屏蔽一切你不喜欢看到的因素，将问题简单化。问题只有简单化才能公式化，变量必须足够地少，毕竟解三元一次方程可比解 N 元 N 次方程来得简单得多。

那么首先我们就来考虑一种最简单的模式，叫做“自由空间传播模型”（如图 10.1 所示），所谓自由，就是没有阻挡，也就是说任何障碍物都没有的场景，用一句红楼梦里的话来说就是“大地一片白茫茫真干净”。这种场景也并非没有，在一些地广人稀的平原地区的农村，竖起高高的铁塔，地面上稀稀拉拉几个建筑物，电磁波可以随心所欲自由驰骋，基本上可以算作“自由空间”了。

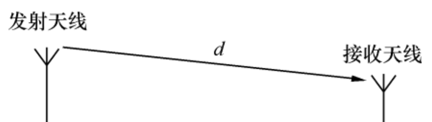


图 10.1　自由空间传播模型

在自由空间里，介质都是理想的、均匀的，电磁波在其中不发生反射、折射、绕射、散射和吸收等现象，只存在电磁波能量扩散而引起的传播损耗。

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \tag{10.1}$$

式中，P_t 是发射功率；P_r 是接收功率；G_t 是发射天线增益；G_r 是接收天线增益；λ 是波长；d 是距离。好家伙，我们不过是想知道一下手机的接收功率，竟然搞得这么复杂，相信也没有几个人有耐心看得下去。

有没有简便一点的公式呢？有的，因为我们要知道一个基站到底能覆盖多远，那么在既定的功率下只要知道一路上的损耗有多大即可，因为手机的接收灵敏度是有限的，损耗过大导致接收功率过小它就没有办法进行解调了。

怎么样来衡量损耗的多少呢，很简单，用发射功率除以接收功率即可，也即 $\frac{P_t}{P_r}$，这样我们不难得出路径损耗 L，如式（10.2）所示，这个式子看起来比式（10.1）要清爽很多，即



$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \tag{10.2}$$

如果我们用分贝来表示，就可以描述如式（10.3）所示：

$$L = 32.45 + 20\lg f + 20\lg d \tag{10.3}$$

也就是说，频率越高，距离越远，损耗也就越大。我们从式（10.3）可以计算出来，1 800MHz 的损耗比 900MHz 要高 6 个 dB，所以大家也就不难理解为什么 1 800MHz 的基站覆盖距离没有 900MHz 的基站远了。需要指出的是，自由空间是不吸收电磁能量的。实质上自由空间的传播损耗是说，球面波在传播过程中，随着传播距离的增大，电磁能量在扩散过程中引起的球面扩散损耗。电波的自由空间传播损耗与距离的平方成正比。实际上，手机天线所捕获的信号能量只是基站发射机天线发射能量的一小部分，大部分能量都散失掉了。

很多人在从事无线通信工作之初可能并不习惯用 dB 来衡量信号的强度，这并不奇怪，因为我们习惯用加减乘除而不是对数来衡量这个世界。就像作者一样，每当看到盎司、英寸、新台币、克拉这样的单位都感到非常抓狂，总喜欢把它们换算成自己熟悉的单位。但是实际上大家今后在工作中就会发现，在无线的世界里，信号波动范围是非常大的，来个快衰落或者进个电梯，你手机的信号变化幅度可能有几百上千倍，但是换算成 dB 就只有 25～30dB，那么你觉得是用倍数来衡量方便呢，还是用 dB 来衡量方便呢？

可惜自由空间传播模型在现实生活中毕竟太少了，尤其是城市，那是高楼林立，无线环境复杂得要命。不过面对这样的复杂局面，20 世纪 60 年代，还是有人不畏麻烦地对日本的电波环境做了大量的测试。用实证的精神把这个问题解出来了，得出了经验公式。请注意，这个是经验公式，不是坐在实验室里一张纸一支笔算出来的。解决这个问题的人名叫 Okumura（奥村），在移动通信领域可谓大大有名。

不过 Okumura 的模型毕竟诞生于 20 世纪 60 年代，到了 20 世纪 80 年代，计算机技术开始蓬勃发展。有个叫 Hata 的人觉得 Okumura 模型用计算机来表述太不方便，于是他以奥村的大量测试结果为基础，增加了多个校正因子，形成了一个新的校验公式，叫做 Okumura-Hata 公式。

在这里，我们主要介绍 Okumura 模型，因为这个模型相对 Hata 模型来得要简单，而且我们又不需要在这里做仿真，这个模型已经足够用了。Okumura 模型如式（10.4）所示，这个公式在自由空间传播模型的基础上进行了修订。

$$L_{50} = L_{\mathrm{F}} + A_{\mathrm{mu}}(f, d) - G(h_{\mathrm{te}}) - G(h_{\mathrm{re}}) - G_{\mathrm{AREA}} \tag{10.4}$$

在式（10.4）中，L_{50} 为传播路径损耗 50%处的值（即中值）；L_{F} 为自由空间传播模型中的损耗；$A_{\mathrm{mu}}(f，d)$为相对自由空间传播模型多出的损耗。至于为什么市区环境相对自由空间会多出这么一部分损耗，理由很简单，市区环境中存在大量的折射、绕射、反射和吸收，这些动作都会造成能量损失，所以在原来传播损耗的基础上增加一个 $A_{\mathrm{mu}}(f，d)$来

进行修正是很符合情理的。我们来看看 $A_{mu}(f, d)$ 的修正曲线，如图 10.2 所示。

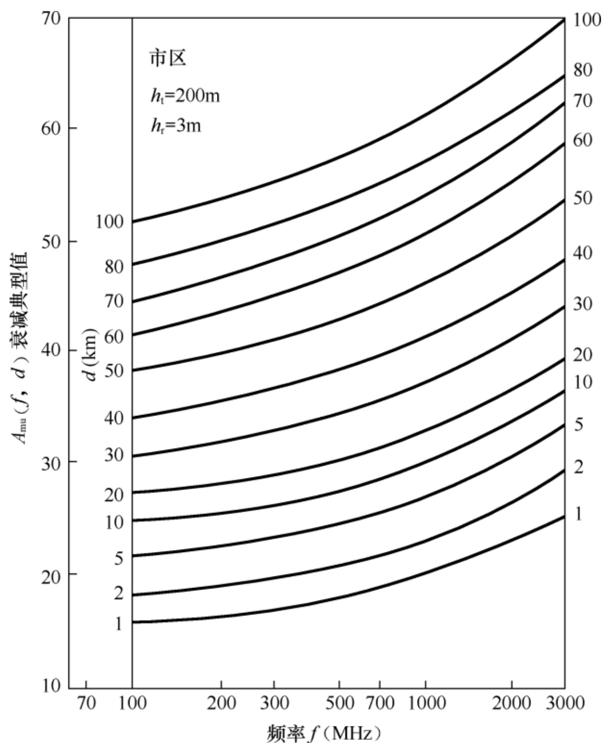


图 10.2　相对于自由空间，多出来的衰减值

我们看到，相对自由空间增加的这一部分损耗 $A_{mu}(f, d)$ 依然是距离 d 和频率 f 的函数，距离越远，频率越高，这一部分新增损耗越大。到这里为止，Okumura 模型描述的场景依然说的是接收功率是距离 d 和频率 f 的减函数，相对自由空间模型不过是损耗更大而已。这与我们的日常经验也相符，我们都知道，离基站越远，信号越差，然后 1 800MHz 的信号比 900MHz 的要差。那么除了这两个变量，是否还有别的变量呢？

恩，确实有，就是式（10.4）中的 $G(h_{te})$、$G(h_{re})$、G_{AREA}。G_{AREA} 没有什么特别的表达式，说的是环境类型带来的增益，我们一般取经验值。而 $G(h_{te})$、$G(h_{re})$ 说明的是天线带来的增益，这又是怎么个增益法呢。我们来看式（10.5）到式（10.7）。

$$G(h_{te}) = 20\log\left(\frac{h_{te}}{200}\right) \qquad 1000\text{m} > h_{te} > 30\text{m} \tag{10.5}$$

$$G(h_{re}) = 10\log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) \qquad h_{re} \leqslant 3\text{m} \tag{10.6}$$

$$G(h_{re}) = 20\log\left(\frac{h_{re}}{3}\right) \qquad 10\text{m} > h_{re} > 3\text{m} \tag{10.7}$$



从上述几个公式可以看出，基站天线位置越高，手机天线位置越高（说明人在二楼、三楼），天线接收的电磁波被阻挡得越少，增益越大。如果读者有过工程经验或者优化经验，这一点不难理解，基站的天线位置越高，损耗也就越小，覆盖也就越远。

曾经有一句古话叫做“登高振臂一呼”，要对 N 多人喊话，首先的动作就是要先爬上一个高台，这样声音才能传得更远。看来不用 Okumura 总结，我们的先人已经知道了这么个道理。至于手机的位置为什么要高，在我们的生活中也有类似的场景，比如去戏园子里看戏，大人有时候会把小孩高高擎起，放在肩膀上（相当于手机位置移高），为啥？还不是因为高处受的阻挡比较少，看得清楚，听得也清楚。

在这里把影响基站传播距离的几点因素都罗列如下，方便读者进行查找和对照。

（1）基站发射功率越大，覆盖越远（见式（10.1），发射功率 P_t 越大，接收功率 P_r 自然越大）。这也就是现在为什么 GSM 基站有的通过 60W 来提升覆盖距离（GSM 基站的标准发射功率为 20W），WCDMA 有的通过 40W 来提升覆盖效果（WCDMA 基站的标准发射功率也为 20W）。其实我们也有过这样的体验，比如导游，面对一群人喊话，总嫌自己嗓门不够大、覆盖范围不够广，基站由于设计的原因，有办法提高自己的发射功率，可是咱们人类的嗓子和肺活量可不是说变就能变的，所以导游同志往往只好身上挂个扩音喇叭，通过这个附加设备来提升自己的音量。

（2）频率越高，损耗越大（见式（10.2），损耗 L 跟距离 d 的平方成正比）。

（3）基站天线位置越高，增益越大，损耗越小（见式（10.4）和式（10.5））。

（4）手机如果在比较高的位置，受到的障碍物的阻挡比较少，接收的信号强度比在平地上要大（见式（10.6）和式（10.7））。而且在 2 层楼以上效果比较显著（式（10.7）相比式（10.6）的增益要翻番，其差别在 3m 这个分水岭上）。

上面 4 点结论非常重要，因为它解释了几个常见现象。比如为什么频段高的设备覆盖效果不如频段低的（GSM1 800M 不如 GSM900），为什么基站需要铁塔（把天线高高挂起，覆盖更远的距离）。

我们可以对基站的覆盖距离进行测算然后决定基站的数量和具体位置，这个工作一般是设计院和运营商的网络建设部的内容。设备商人员和运营商市场人员知道了这几个结论，就能和网规人员更好地沟通，以期取得更佳的后期效果。

10.2 谁让你变成了地图测绘人员—　谈谈那该死的路测和 CQT 测试

如果说对基站的覆盖效果进行评估和调整网规和网优人员都有参与，那么本节所述

的路测和拨打测试基本就是实打实的纯网优工作，跟网规基本不搭界。

一直以来，网优部门在运营商里面就被看成比较神秘的部门，因为它们与其他部门交集比较少，所从事的工作又很复杂，一般人并不太了解。更重要的一点是，这个部门的人总是见不到人，一问，经常得到的回答就是："出去搞路测去了"，或者说"出去搞拨打测试去了"，这两项工作局外人听得云里雾里，因此更增添了这个部门的神秘感。那么，什么是路测和拨打测试？为什么要做这些事情？做这些事情对网络有什么好处？

在回答这些问题之前作者想先讲两个故事，让大家对网优里面路测的工作有一个比较感性的故事。

作者大学毕业时曾经参加了某省一家运营商的面试，面试官正是省公司人力资源部总监。当时一起面试的除了作者还有好几个人，这几个人跟作者一样老家都是这个省的。面试官面试完我们之后开始拉家常，拉家常的方式很特别，就是问你是哪个县哪个村的，当你说完之后面试官若有所思，然后跟你描述那一块的山川河流，人物风景，好像他亲自去过一样。一连七八个人，都来自不同的地方，他竟能一一说出来当地的情况，着实把我们一个个雷得里焦外嫩。后来一问缘由，才知道该人力总监原来是技术出身，在该运营商草创之时，把全省多数地方跑了个遍。

后来作者在该运营商工作了一段时间，逐渐知道了工程选址和路测是怎么回事。有一次和一个网优人员一起出去吃饭，席间他频频和几个服务员美眉搭讪，所采取的手段也无非是问人家的老家，然后展示他对当地的山川地理的熟悉程度，引来几个美眉频频侧目，问他是从事何等职业。在一旁的作者已经熟悉了这个套路，因此丝毫没有给他面子，答道："他是搞地图测绘的"。

地图测绘不过是句玩笑话，但读者也不难从中看出路测的艰辛程度和在路测的时候对当地的电磁环境（山川地理）的了解程度。所谓路测，也叫 DT（Driver Test，驱车测试）；所谓拨打测试，也叫 CQT（Call Quality Test，呼叫质量拨打测试）。通常，很多问题都可以在网络上体现出来。但是，还有很多问题在网络上并不能得到体现，那就非得去现场不可。而在现场的测试方法，也无非以上两种，DT 测试和 CQT 测试。

DT 测试的作用除了定点清除某些故障以外，其主要的作用还是用来反映一个城市每条道路的网络质量情况。其原理是这样的，在车里用一台测试手机和计算机相连，在计算机上调好程序，让手机拨打某个号码，通话一阵后自动挂断，过一阵再拨打，再通话，如此周而复始，其作用就是模拟普通用户的通话情况，计算机在后台收集这些数据，一圈跑下来之后再对数据进行分析。

且慢！虽然你在路上不断地拨打电话来模拟用户行为，但是这些数据汇总之后，你怎么知道某个电话具体是在哪个地点拨的？如果不知道具体的地点的话，你接下来怎么进行有针对性的优化？所以除了用来做拨打测试的手机和收集数据的计算机以外，还需



要有一样设备用来配合记录通话的地点，那就是 GPS。

"笔记本电脑"、"测试手机"、"GPS"可谓是路测的三剑客，缺一不可！由于路测经常在外面跑，经常要受颠簸，而且颠簸的时候还要能正常工作，不能死机，硬盘也不能坏掉，所以用于路测的计算机往往是高端笔记本电脑，在早年路测人员的工具组合中，几乎都是清一色的"小黑"——IBM Thinkpad，如图 10.3 所示。

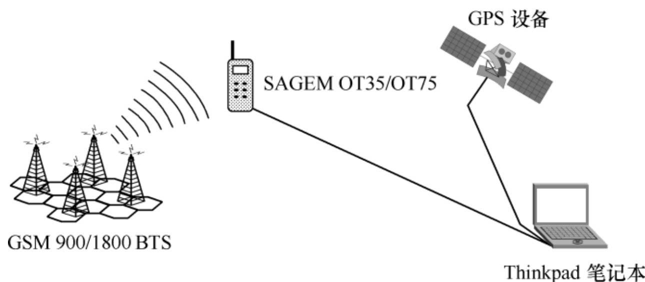


图 10.3　一套典型的路测设备

那么路测得到的结果是什么呢，通常是如图 10.4 所示的路测地图，我们会发现一张路测地图上会根据每个段落接收电平的大小来标注不同的颜色。比如图 10.4 中，−140dBm 至−95dBm 这个区间用红色标注（由于本书不是彩色印刷，无法显示颜色，具体情况大家可参见任意一张路测图），说明信号极差，需要马上进行优化或者加站；−95dBm 至−85dBm 这个区间用黄色标注，说明信号有待加强，但是还可以接受；−85dBm 至−80dBm 这个区间用蓝色标注，说明信号不错；−80dBm 至−75dBm 这个区间用绿色标注，说明信号非常好。

不要以为得出的这个结果很简单，图上其实还有很多小的标注，由于书的纸张大小的问题，我们无法在本书的插图中一一展示出来。这些小的标注记录了很多关键事件，比如掉话、切换等。这些关键事件可以点开来看，你可以看到整个通话过程的信令流程，从而能对具体的问题做出详细的分析。DT 测试能对问题的具体地点进行精确的定位（有赖于 GPS），又能反映网络的一大堆信息（接收电平、通话质量、干扰水平、掉话、拥塞情况等），所以是当前用的最多的分析网络状况的手段。

DT 测试的优势是明显的，但是其弱点也同样非常明显，那就是汽车只能在马路上开，很多地方都去不了，比如林荫道、走廊、室内，等等。我们看看图 10.4，就会发现路测只能反映某几条线的网络情况，然后全网大片大片的地方空着，不知信号质量如何，这些地方汽车去不了或者不好去，就只能两眼一抹黑。

更重要的是，据统计，通常在马路上打电话的情况是比较少的，80%的电话都是发生在室内。对于室内通话的效果的评估，路测显然是无能为力的。也就是说路测花费大量的精力和物力能反映的问题连 20%都不到，其他 80%甚至更高比例的问题我们需要通

过其他方式来解决。

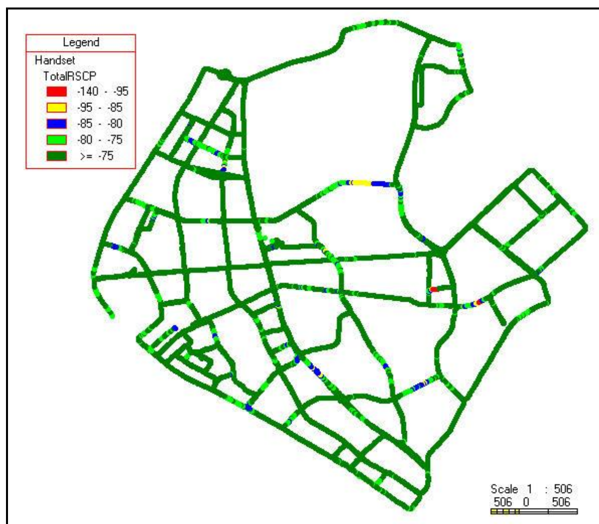


图 10.4　湖北省宜昌市路测情况

比如某个 VIP 用户家里信号不好，你打算怎样来评估他所处位置的信号质量呢？是开着汽车绕着他所在的小区转一圈，还是叫个人拿着测试手机在他家门口进行一下测试，甚至进屋里去测试？如果条件允许的话，答案显然是后者。在当前情况下，CQT 测试是 DT 测试有效的补充，也是目前室内测试的主要方法。

当然，除了 CQT 测试能去 DT 不能去的地方以外，还有其他的优势，那就是 DT 测试得到的是一堆冷冰冰的数据，而 CQT 测试是人在现场打电话，得到的是直接的感知。另外，像回音、串音等网络问题不能通过 DT 测试发现。

拨打测试一般是在城市中选择多个测试点，在每一个测试点进行一定数量的呼叫和被叫。通过记录接通情况和测试者主观评估的通话质量，来分析网络的运行质量和存在的问题。

我们看到，DT 测试和 CQT 测试都是当前主要的评估网络的方法，但是这两种方法都有一个共同的问题，那就是成本很高。要对城市的道路进行评估，需要开车围着城市转，人员、车辆、设备的投入都不小；至于 CQT 测试，成本就更高昂了，一个人一天也跑不了几个点，只能用于解决一些重点客户的投诉。

除此之外，DT 和 CQT 都是通过机器拨打或者人工拨打的方式来对用户的感知进行小批量的模拟和评估。这毕竟是一种抽样的做法，这样一来样本容量有限，无法了解全网的情况，大家看图 10.4，满城跑的 DT 测试，所得出的结果也不过是那几条线而已，遑论 CQT 测试了；二来毕竟是在模拟用户的感受，不是用户当时的、直接的真实感受，有



没有什么办法得到用户在当时通话过程的感受呢？

10.3 一场网优的人民战争—— MR 测量报告

做网优的人都有一个梦想，假如有一天不再需要开着汽车，到农村坑坑洼洼的路上去颠簸，抑或是在城市里把时间都打发给等待红绿灯，那该有多好。还有那个该死的 CQT 测试，最好也别叫我去，去大楼里蹿上蹿下地打电话、记录数据和填表格，实在不是一件轻松的事情。最好是能够舒舒服服地坐在办公室，泡上一杯咖啡，打开电脑，测试数据就有了，这个数据最好还别是我们自己人测的，最好是最终用户测试的数据，这样才能更真实地反映他们的感受，这不比模拟的强么。

试想一下，自己不用出去做 DT 测试和 CQT 测试，给所有用户发一个测试手机，由他们去对整个网络进行无死角、全天候的测量。测量的数据可以自动汇总上来，网优人员只需要坐在办公室里喝咖啡和敲键盘即可。发动人民战争，让全民陪你一起做网优，这是怎样的春秋大梦啊，听起来是不是比那个“我想有一套房子，背靠二环，面朝大海，春暖花开，4M 宽带，不还房贷”还不靠谱。

不过，现在这种梦想可以部分实现了，部分这个词很有嚼头，至于为什么是部分实现，我们一会再说。无论是 GSM 还是 WCDMA，抑或是 cdma2000、TD-SCDMA，手机其实在通话的过程中都在不断向 BSC 上报一种数据，这种数据对于网络而言是不可或缺的，它的名字就叫做测量报告（Measure Report）。

手机在通话的过程中，总会不断地对下行链路的接收电平、接收质量等进行测量，一定周期内，手机还会对邻区的接收电平进行测量。与此同时，基站也在对上行链路的接收电平、接收质量进行测量。手机在测量这些数据的同时，也通过上行链路将这些信息发送给基站，基站对信息进行汇总，就构成了如图 10.5 所示完整的测量报告。



图 10.5　测量报告（GSM）

这些测量报告对于功率控制和切换这些无线通信中的关键动作而言是极其重要的。就以 GSM 为例，要是手机和基站都不向 BSC 上报测量报告，BSC 就没有上下行的接收电平的数值，不知道电平值，上下行的功率控制也就无从谈起。另外，除了电平值以外，上下行的接收质量以及邻小区的情况都是用来进行切换的重要参考信息。

对于 WCDMA 或是 TD-SCDMA，上报的内容略有不同，比如会上报扰码、E_c/N_0，RSCP 等。但是其作用与 GSM 也大同小异，都是用来做功率控制和切换控制的。

我们看到，测量报告初始的作用是为了进行功控和切换等一系列关键动作。到后来，人们发现由于测量报告是对人们通话过程中的一些关键数据的实时的真实记录，很有利于呈现全网的情况，又把这部分报告单独提取出来做网优用。这跟搜索引擎的发展历程有点类似，搜索引擎先是根据用户输入的关键字（相当于测量报告）来做相应的反应，呈现相应的数据（类似于 BSC 根据测量报告来进行功控、切换等动作）。到后来发现用户输入的这些关键字极富价值，都可以用来反映搜索引擎用户的整体相关情况，根据《壹佰度》的记载，百度都可以根据这些信息来出具相当权威的咨询材料了。

用 MR 数据来对网络进行分析有以下几个优点：其一是海量数据，和 DT 与 CQT 不同，MR 数据可以涵盖一个网络所有载波的所有时间的上报数据，试想一下，路测和拨打测试要对全网的每一个载频都测试到，那得花费多长的时间和多少人力物力；其二是这些数据源于的就是最终用户当时通话的情况，而 DT 和 CQT 是在模拟，是在试图重复用户通话的情况，怎么来说都是第二手数据，不如第一手数据更能反映用户的真实感受。

我们在上面说了很多 MR 测量报告的优点，接下来要说一个它的致命缺点，正是这个缺点，让它无法取代 DT 测试和 CQT 测试，而只能成为诸多网优手段中的一种。这个缺点就是 MR 数据不含 GPS 信息，无法对通话地点进行精确定位！正是这个缺点让网优人员不用路测的梦想只能“部分”实现。

大家回忆一下路测和 CQT 测试的场景，路测的时候通常会在车顶装一个 GPS 天线，然后通过电缆和计算机相连，用于记录通话过程中所在的经度和纬度，因此一圈路测跑下来的结果，便是能得到一个城市完整的道路的情况。将图 10.4 按比例尺放大，是不是相当于一张宜昌市的市内交通路线图呢？至于 CQT 测试，就没有这么智能了，只能是半自动的，在拨打测试的表格里，一般都有“经度和纬度”这一栏，负责拨打测试的人将自己手机上测到的 GPS 信息填上去即可。

那么 MR 在定位上面会出现什么状况？MR 只能告诉你这次通话发生在哪块载频，也就是说，MR 的定位只能达到小区级的。我们来看看图 10.6。

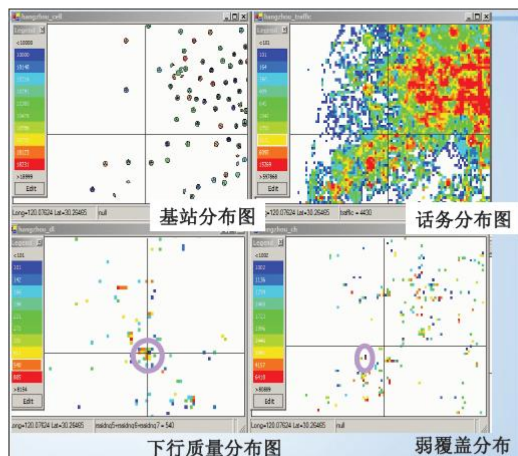


图 10.6 MR 地图

从图 10.6 可以看出，MR 报告也可以像路测一样做地图，但是地图并不是它的长项。



由于没有精确的 GPS 信息，它只能以基站（或者说小区）为维度来呈现各种数据。虽然图形很难看，但是图 10.6 中的数据却是我们想要的，话务分布图可以说明一个城市哪些地方话务高，哪些地方话务低；下行质量分布图能说明什么地方通话质量好，什么地方通话质量差；弱覆盖分布图可以说明哪些地方信号电平比较低（从手机上看就是格数比较少）。到这里，大家可能要问，既然 MR 数据不含 GPS 信息，那么图 10.5 中所示“接收距离”是怎么回事？

其实图 10.5 中指的是 GSM 的测量报告，GSM 由于是时分系统，所以会对手机发射信号的时间进行一个评估，这个评估 BSC 会用“TA 值（Time Advance，时间提前量）”的方式来告诉手机，这个值非常粗糙，一个 bit 的精度在 550 米的范围内，这么大的浮动范围让它实在是没有办法用来进行定位。

因此，我们通常不会用 MR 地图来进行问题分析，用得比较多的一般是如图 10.7 所示的统计柱状图。我们知道，MR 测量报告的一个特点是海量数据，想想也难怪，所有载频所有用户的数据你都要记录，这数据不庞大才怪了。数据量大的好处是便于进行统计分析，毕竟样本越多，离事实也就越近。图 10.7 是对上下行电平、上下行质量、上下行链路平衡等分布情况的一个统计，其实这些信息加上对邻区的测量报告放到一起，就可以衍生出很多各种各样的网优分析。

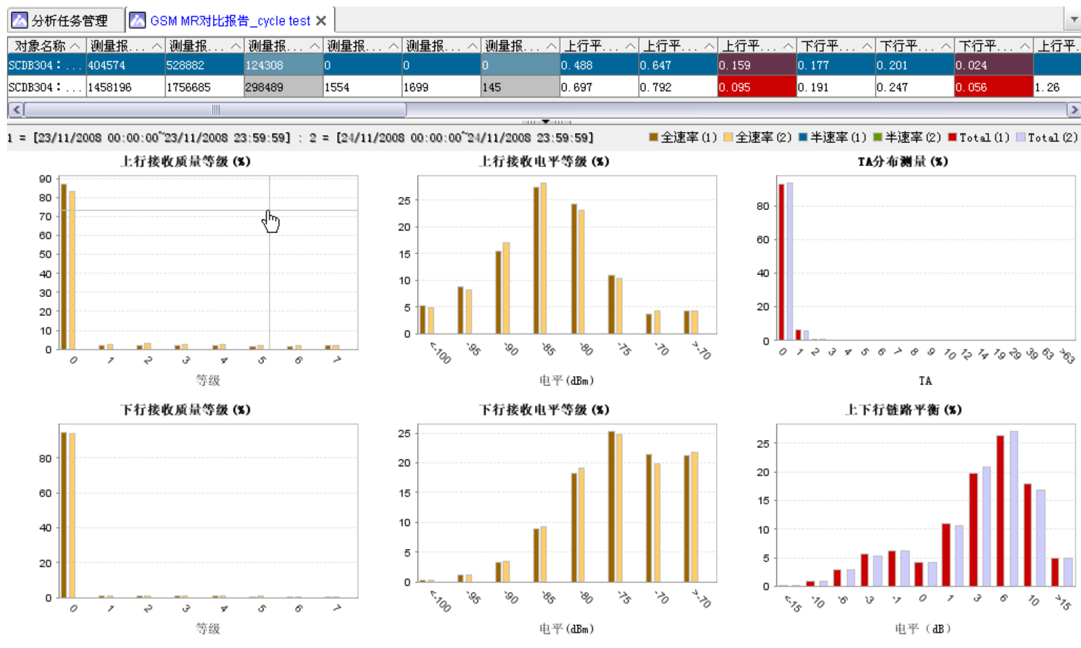


图 10.7　MR 分析报告

到这里，网优人可能又会有新的梦想："假如有一天所有手机都有 GPS 功能，测量报告都自动上报 GPS 信息……"。作者认为，这个梦想要实现的难度非常大，修改协议，在测量报告中添加 GPS 信息或许并不困难。但是现在的通信标准都是国际标准，这样的修改显然会有法律风险，因为无论是谁，恐怕都不希望你一边打电话，运营商一边就能根据 GPS 信息画出一条精确的你活动的轨迹图！

10.4 运营商最关注的网络指标— 掉话率、接通率、数据业务下载速率

应当说，反映网络性能的指标是很多的，作者曾经看过一个性能指标的统计表格，密密麻麻的 Excel 足有十几页之多。其实其中绝大多数指标运营商并不关注，一般他们所重点关注的指标，也即列入 KPI 考核的指标只有那么几个，掉话率、接通率、数据业务下载速率等。这些关键指标也不是一成不变的，通常会随着网络的建设阶段和自身业务发展战略的不同而有所不同。

10.4.1 最糟糕的用户体验— 掉话

像掉话率、接通率这几个指标被列入 KPI 考核是有道理的，掉话可以说是通信过程中最糟糕的一种体验了。你翻开移动或者联通的 KPI 考核办法，掉话率也一般是被列在第一条。掉话等于说是生生把你的电话进行掐断，不管你是在谈几千万的生意也好，或是什么别的重要的事情也罢，通通一视同仁。我们知道，插话打断人家说话都属于一种不礼貌的行为，何况是掐断（从发现掉话到再次接通得 8～10 秒）。掉话的原因通常有以下几种。

（1）弱信号掉话。

这种掉话通常是受地形和建筑物的影响，最典型的例子就是电梯了。电梯由于处于封闭空间，外面用的又是金属包裹的门，因此对电磁信号的屏蔽特别厉害。大家应该没少见过这样的例子，打着打着电话，一进电梯就不行了，"喂喂喂"几声对方没反应，然后一看，通话的绿色话筒已经显示为红色，掉话了，再一看信号，好家伙，只有一格。为了解决这个问题，运营商也没少在室内覆盖上投入，大家在电梯里应该可以经常看到三家运营商的标识，"G3 已覆盖本电梯"、"WO 已覆盖本电梯"、"天翼已覆盖本电梯"，为的就是告诉你，俺在你电梯上方已经安装了吸顶天线，放心打电话吧，不要犯上电梯恐惧症。

除了电梯以外，这种情况还经常在丘陵地区碰到，经常车在山跟前拐过一道弯，有人的电话就掉话了，山体对于电磁信号的阻隔，比起电梯来自然毫不逊色。面对这种场景，通常除了新增基站外没有别的好办法。



（2）切换掉话。

这也是现网比较常见的一种掉话，很多情况下都是因为邻区没有配好引起的。邻区一般要成对配置才能不产生这种掉话，就好比交朋友一样，假如你认为别人是你的朋友，而别人不认为你是他的朋友（配置的是单向邻区），那么你的钱委托他保管（切换）通常就只能肉包子打狗有去无回。

（3）干扰掉话。

这种情况一般发生在城区，现在城区的基站越来越密，在有限的频率资源的条件下带来的结果势必就是干扰越来越大。干扰一大，信噪比低于解调门限，就容易造成信号解不出来而形成掉话。其实这种类似的生活场景也有，通常发生在超市或者公交车这种非常嘈杂的环境下，你跟朋友在超市里说话（通话），然后旁边买菜的和卖菜的讨价还价的声音太大（干扰太强），虽然你们俩声音也不小，但是还是听不清彼此说话（信号相对噪声不够大，导致信噪比低于解调门限），于是，你们俩只好闭嘴了（掉话）。

（4）基站故障掉话。

由于天馈线损坏、进水或者接触不良，或者载频产生故障也容易产生掉话。这也不难理解，载波就相当于人的声带，天馈系统就相当于人的咽喉口腔，这两个地方有故障了，发生掉话很正常。

10.4.2　你不能老让我找不到人—　谈谈接通率

除了掉话，接通的成功率也是运营商非常关注的问题。打电话能够接通的概率就是接通率，这个概率自然越高越好，低了的话一来用户心情可能变得烦躁，对品牌形象会造成损伤；二来用户一生气这个电话不打了，也会造成经济利益的损失；三者每次呼叫不管接不接得通都会因为信令的流量占用一定空中接口的资源，接通的概率越低，就意味着资源的无效利用越多，算起来相当不划算。总之，接通率降低带来的后果就是用户找不着人的概率增加。一次两次拨打电话传来“您拨打的电话无法接通”或许还可以理解，要是多出现几次，人也难免会有些恼火。毕竟，人家打电话体验的是一种付费服务，你不能老让人家找不着人不是。这种“您拨打的电话无法接通”的原因通常有以下几种。

（1）位置更新导致无法响应寻呼。

你在通讯录里找到对方的号码，然后一键拨出去，就等着对方应答了。这个过程很短，潇洒得很，可是网络没这么潇洒。它要做的第一件事情就是找到被叫此时所在的位置，对于这个问题它别无它法，只能进行寻呼。所谓寻呼，就是拉大嗓子漫山遍野地（其实就是在一个 LAC 区下）呼喊着被叫用户的名字，期望被叫能够回应。当寻呼到来的时候，如果被叫用户恰好在做位置更新（正常位置更新、周期性位置更新），那对不起，被叫用户的手机是没有办法对寻呼消息做出任何响应的。不能响应寻呼，也就意味着此时

是不会做出和主叫对接的动作的，那么接通率自然就下去了。做位置更新的时候不能响应寻呼是有其道理的，正在进行位置更新说明其位置有可能发生变化（比如从一个 LAC 区到另一个 LAC 区），而寻呼是根据此前的位置信息下发消息的，这两种信息很可能不一致；此外，位置更新的时候手机跟网络有许多信令要交互，没法空下来再去接收寻呼。基于此类考虑，在位置更新的时候就不会去响应寻呼，从而导致接通率下降。

我们在 2.3.2 节中描述过，位置更新就好比你外出游玩的时候给家中的老妈汇报你现在的位置，而寻呼就好比寻人启事。当你跟老妈汇报情况（位置更新）的时候，别人喊你（寻呼）自然是没有时间搭理。

（2）资源紧张无法进行分配。

空中接口的资源总是有限的，当资源比较紧张，拥塞程度比较高的时候。新的接入网络的申请就很有可能被拒绝或者分配资源失败。这种情况一般发生在话务量比较大的热点小区，热点小区的资源在忙时就像春运的火车票，买不到（申请信道遭拒绝）的几率相对而言比较高。出现了这种情况，常见的解决途径就是对其进行扩容。

（3）故障造成接通率降低

这属于老生常谈了，一旦网络里某个区域的设备出了问题，不管是天馈也好，载频也罢，那么自然各方面的性能都会下降，不单单是接通率和掉话率这么简单。

10.4.3　未雨绸缪，争夺未来制高点—　数据业务下载速率

话音业务的天花板即将到来，数据业务将成为未来的趋势和拉动收入增长的动力已成为运营商的共识。从 2005 年开始，国内三大运营商都开始进行转型，转型的动作非常一致，都是努力提高非话音业务收入在总收入中的占比，培养用户数据业务和增值业务的习惯，以期在话音的天花板到顶之前完成转身。为此，中国电信和中国移动在口号上都发生了变化，比如中国电信宣称要做综合信息运营商，中国移动把自己的宣传标语从“移动通信专家”改成了“移动信息专家”。

不过转型喊了这么多年，始终有点“空听楼梯响，不见人下来”的感觉，虽然非话业务的收入比重一直在提高，但是话音业务的地位依然举足轻重。大家从运维考核的 KPI 就可以看出，掉话率、接通率，还有已经消失的话音寻呼成功率等无一不是话音的关键指标。虽然运营商的核心层已经达成共识，要推动企业进行转型，但是执行层依然很现实，挣钱比转型更重要，谁是我的“粮仓”我就挺谁。大家都在等待，虽然趋势已经非常明朗，但是大家都需要看到那个拐点——数据业务收入超越话音收入。终于，2011 年 1 季度财报发布了，日本两大主流运营商 NTT 和 KDDI 数据业务的 ARPU 值都超过了话音业务的 ARPU 值（如图 10.8 所示），预言已久的事终于到来了。

由于日本是全球 3G 业务的先驱和风向标，因此可以预见中国乃至全球多数地区数



据业务超话音也只是个时间问题。所以在 2010 年中国移动的考核办法中，数据下载速率已经纳入了经营绩效的 KPI。预期在今后三大运营商的考核体系中，这个指标将占有越来越重要的地位。从技术层面而言，这个指标没有太多可讨论的地方，引用 NTT 和 KDDI 数据，以及中国移动 KPI 指标的目的不过是说明数据业务已经成了未来发展的关键制高点。随着智能手机的发展和 3G 业务的增多，在未来拥有一张优质的数据网络将比拥有一张优质的话音网络来得更为重要！

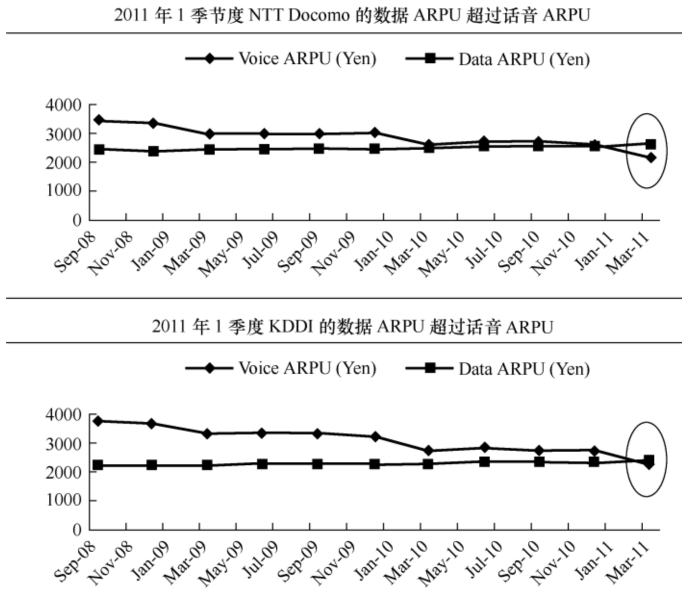


图 10.8　2011 年 1 季度 NTT 和 KDDI 数据业务 APRU 超话音

以时间为轴来看待这些现有的和已经消失的 KPI 指标，就会发现一些颇值得玩味的东西。最早网络覆盖不全甚至可以说有限，所以关注的都是寻呼成功率、无线系统接通率等指标，追求的是能让客户打电话，至于效果如何，那再说；后来覆盖不再是主要矛盾，随着用户的发展，话务量激增，容量和通话感知开始变得日渐重要，因此拥塞率、掉话率开始备受关注；到后来运营商开始转型，开始重视并大力推广数据业务，数据业务的下载速率又纳入了 KPI 体系。我们从中也可以看出，KPI 指标随着网络的不断发展也在不断地刷新，但是掉话率和接通率依然屹立不倒，成为衡量一个网络优劣的重要指标。

10.5 常见的几个网络问题—　单通、串音、乒乓重选

在本节中需要阐述的是几个常见的网络问题，这几种问题不太常见或者不太容易被

注意，但是一旦遇到了会觉得这些现象很诡异，让人很有兴趣一探究竟。这也就是单通（只有一方能听到声音）、串音（听到其他正在通话的人的声音）和乒乓重选（手机信号一会突然没有了，很短的时间又突然有了，格数也随之不断变化）。我们首先来看看单通。

王菲有一首很有名的歌，叫做《笑忘书》或者说《给自己的情书》。可是除非情非得已，没人愿意自己给自己写情书；同样除非被运营商搭错线，也没有人愿意自己给自己打电话。但是大家或许都有过这样的体验，拨打电话的时候，好不容易通了，我们开始“喂喂喂”，但是话筒里传来的都是自己的声音，对方的声音根本听不到，这种打电话只能听到自己声音的情况有一种专业的名词术语，这个词很形象，叫做“单通”。“单通”除了这种情况以外还有一种常见的场景，那就是你能很清楚地听清楚对方在说什么，但是对方没有办法听到你在说什么，这也叫做单通。

我们在图 10.9 和图 10.10 中分别描述了单通的两种情况，其中图 10.9 演示的是某段线路被环回了，这个环回既可能是硬件层面的也可能是软件层面的，那么张三就成了既是发送方又成了接收方，那么自然出现了自己听到自己声音的状况。而图 10.10 中，李四的下行链路质量不错，他能清晰地听到张三在说什么，但是他的上行链路干扰很严重，质量不行，所以他说的话张三根本听不清楚。

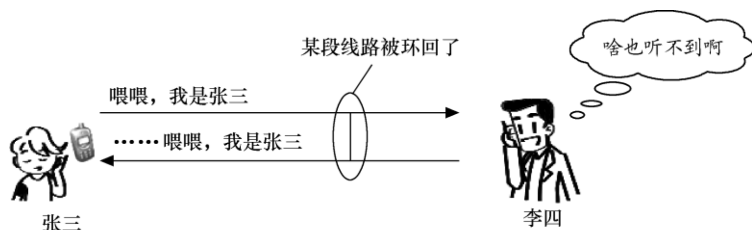


图 10.9　单通现象 1

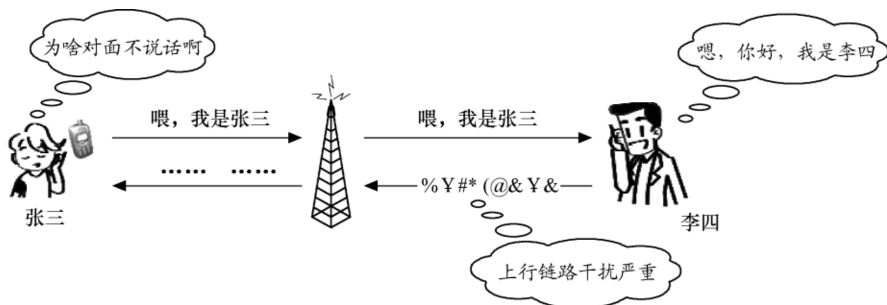


图 10.10　单通现象 2

串音的基本原理和单通差不多，基本的原因就是搭错线，不管是软件层面的还是硬件层面的。比如 MSC 分配链路的时候将尚未释放的链路分配了出来，那么就有可能造成串音。

所谓乒乓重选，指的是某个区域内有 N 个信号强度差不多大小的小区覆盖，手机会



不断去选择信号最强的小区，由于这些小区的信号在不断变化，所以导致手机在这些小区里来回地切来切去，就像打乒乓球一样。反映在手机上大家就会看到手机的信号突然消失了，然后马上又变回若干格数，这是因为手机在重选选择小区。比较好的解决办法就是对这些小区的覆盖做一下调整，不要出现一个区域有太多小区信号强度相同的情况，要有一个主导小区，信号强度明显强于其他小区。另外，通过参数调整改变门限也能部分解决这个问题。

本章的内容就介绍到这里，在本章中，我们介绍了 DT 测试、CQT 测试、MR 分析等基本的网优分析手段，了解了决定一个基站覆盖范围和效果的相关因素，阐述了运营商关注的重要 KPI 指标和网络常见的一些有意思的问题。本章的主要目的是希望大家能对网规网优有一个初步的概念，随着网络覆盖的完善，网规网优的作用会越发凸显出来，在运营商里也会有越来越多的话语权。所以无论作为运营商的前端工作人员也好，还是设备商的非网规网优人员也罢，都应当适当地了解点网规网优知识，在交流沟通和工作的衔接方面，才会更加得心应手。

后记

Afterword

我，有一个梦想

读书的时候，我们勤勤恳恳，钻研着生涩的公式，研读着复杂的通信理论；工作的时候，我们忙忙碌碌，敲击着冰冷的键盘，接触着各样的设备单板。

每当我看到一板一眼的通信图书之时，我心里总升腾起一个梦想："通信，是不是也可以写得好看"，相信这也是许多通信人的梦想。很多人开始尝试，开始朝那个方向努力，我也是其中一员。

写得通俗、写得轻松活泼的目的不是让大家一乐，而是希望大家读完之后能够对某种通信技术的梗概有所了解，接下来好进行深入的学习。无论是学习 GSM，还是 WCDMA，又或 LTE，先对它们有一个整体的认识可能非常重要。因为这些内容都非常复杂甚至有点艰深，对于一个初学者而言，直接去读这些内容，很可能翻了几章之后连门都摸不到，从而丧失学习的兴趣。

就好比画家教一个新手画画一样，如果告诉他从头画起，再画躯体，再画四条腿和尾巴，每画一部分都务必详尽。那这个新手很可能在画老虎头的时候就觉得过于艰难而丧失了画画的兴趣。如果让他先把老虎的轮廓画出来，然后逐步填充和完善细节，这个过程要容易入手的多。

本书的目的在于"推开移动通信之门"，让对移动通信不熟悉或者对某种制式不熟悉的读者能够迅速找到门，并且对这种制式能够有整体的了解，从而可以看清楚接下来要走的路，那本书的目的也就达到了。

在本书的最后，作者衷心希望，在通信的殿堂里，不仅仅有庄严大气的《资治通鉴》，也涌现更多的像《明朝那些事儿》一样轻松活泼的作品，让大家的学习过程能变得更简单、更轻松、更愉快。

作　者

缩略语

Acronyms



2FSK	Binary Frequency Shift Keying	二进制频移键控
3G	3rd-generation	第三代移动通信技术
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
3GPP2	The 3rd Generation Partnership Project 2	第三代合作伙伴计划 2
AAA	Authentication、Authorization、Accounting	鉴权、认证、计费
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	非对称数字用户环路
AGCH	Access Grant CHannel	允许接入信道
AICH	Acquisition Indication CHannel	捕获指示信道
AM	Amplitude Modulation	调幅
AM	Acknowledged Mode	确认模式
AMC	Adaptive Modulation and Coding	自适应调制编码
AMPS	Advanced Mobile Phone System	高级移动电话系统
ANR	Automatic Neighbour Relation	自动邻区关系
ANRF	Automatic Neighbour Relation Function	自动邻居关联功能
ARIB	Association of Radio Industries and Business	日本无线工业及商贸联合会
ARPU	Average Revenue Per User	每用户平均收入
ARQ	Automatic Retransmission reQuest	自动重传请求
ASCII	American Standard Code for Information Interchange	美国信息互换标准代码
ASK	Amplitude Shift Keying	幅移键控
AT&T	American Telephone & Telegraph	美国电话电报公司
ATIS	The Alliance for Telecommunications Industry Solutions	电信行业解决方案联盟
AuC	Authentication Center	鉴权中心

B3G	Beyond 3G	超 3G
BBU	BaseBand Unit	基带单元
BCCH	Broadcast Control CHannel	广播控制信道
BLAST	Bell Labs Layer Space Time	贝尔实验室分层时空编码
BPSK	Binary Phase Shift Keying	两相相移键控
BSC	Base Station Controller	基站控制器
BSIC	Base Station Identity Code	基站识别码
BT	British Telecom	英国电信
BTS	Base Transceiver Station	基站收发台
BWA	Broadband Wireless Access	移动通信与宽带无线接入
CA	Carrier Aggregation	载波聚合
CAPEX	Capital Expenditure	资金、固定资产的投入
CB	Coordinated Beamforming	波束赋形
CC	Country Code	国家码
CCCH	Common Control CHannel	公共控制信道
CCSA	China Communications Standards Association	中国通信标准协会
CDMA	Code Division Multiple Access	码分多址
cdma2000	Code Division Multiple Access 2000	一个 3G 移动通信标准
CGI	Cell Global Identifier	全球小区识别码
CMMB	China Mobile Multimedia Broadcasting	中国移动多媒体广播
CoMP	Coordinated Multi-Point	协同多点
CP	Cyclic Prefix	循环前缀
CPICH	Common PIlot CHannel	公共导频信道
CPU	Central Processing Unit	中央处理器
CQT	Call Quality Test	呼叫质量拨打测试
CRC	Cyclical Redundancy Check	循环冗余码校验
CS	Coordinated Scheduling	协作调度
CT	Communication Technology	通信技术
CTCH	Common Traffic CHannel	公共数据信道
CTIA	Cellular Telecommunications Industry Association	蜂窝电话工业协会
CWTS	China Wireless Telecommunications Standards group	中国无线通信标准研究组
DAB	Digital Audio Broadcasting	数字音频广播



DCA	Dynamic Channel Allocation	动态分配信道
DCCH	Dedicated Control CHannel	专用控制信道
DCS	Dynamic Cell Selection	动态小区选择
DPCCH	Dedicated Physical Control CHannel	专用物理控制信道
DPCM	Differential Pulse Code Modulation	差分脉冲编码调制
DPDCH	Dedicated Physical Data CHannel	专用物理数据信道
DRX	Discontinuous Reception	不连续接收
DSP	Digital Signal Processor	数字信号处理
DT	Driver Test	驱车测试
DTCH	Dedicated Traffic CHannel	专用业务信道
DTX	Discontinuous Transimission	不连续发射
DVB	Digital Video Broadcasting	数字视频广播
DwPTS	Downlink Pilot Time Slot	下行导频时隙
EDGE	Enhanced Data Rate for GSM Evolution	增强型数据速率 GSM 演进技术
E-DPDCH	Enhanced Dedicated Physical Data CHannel	增强型专用物理数据信道
EPC	Evolved Packet Core	演进的分组核心网
EPS	Evolved Packet System	演进分组系统
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	欧洲电信标准协会
E-UTRAN	Evolved-UTRAN	演进的 UMTS 陆地无线接入网
FCC	Federal Communications Commission	联邦通信委员会
FCCH	Frequency Correction CHannel	频率校正信道
FDM	Frequency Division Mutiplexing	频分复用
FDMA	Frequency Division Multiple Access	频分多址
FPLMTS	Future Public Land Mobile Telecommunication System	未来公众陆地移动通信系统
FSK	Frequency Shift Keying	频移键控
GBR	Guranteed Bit Rate	保证比特率
GGSN	Gateway GPRS Support Node	网关 GPRS 支持节点
GMSK	Gaussian filtered Minimum Shift Keying	高斯滤波最小频移键控
GP	Guard Period	保护时隙

GPRS	General Packet Radio Service	通用分组无线服务技术
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
GSM	Global System of Mobile communication	全球移动通信系统
HDTV	High Definition Television	高清晰度电视
HLR	Home Location Register	归属位置寄存器
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access	高速下行分组接入
HS-DSCH	High-Speed Downlink Shared CHannel	高速下行共享信道
HSPA	High Speed Uplink Packet Access	高速上行链路分组接入技术
HSPA+	HSPA Evolution	演进式 HSPA
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access	高速上行分组接入
IC	Interference Cancellation	干扰抵消
ICI	Inter-Carrier Interference	子载波间干扰
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	美国电气和电子工程师协会
IMEI	International Mobile Equipment Identity	国际移动设备身份码
IMS	IP Multimedia Subsystem	IP 多媒体子系统
IMSI	International Mobile Subscriber Identification	国际移动用户识别码
IMT-2000	International Mobile Telecom System-2000	国际移动电话系统-2000
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunication-Advanced	先进国际移动通信
IP	Internet Protocol	网络之间互连的协议
IPR	Intellectual Property Right	知识产权
IS-95	Interim Standard-95	高通公司发起的第一个基于 CDMA 数字蜂窝标准
ISI	Inter Symbol Interference	码间干扰
IT	Information Technology	信息技术产业
ITU	International Telecommunications Union	国际电信联盟
JD	Joint Detection	联合检测
JP	Joint Processing	联合处理
JT	Joint Transmission	联合传输
LAC	Location Area Code	位置区码
LAI	Location Area Identity	位置区识别码
LCR TDD	Low Code Rate TDD	低码片速率 TDD 方案



LoS	Line -of-Sight	视距
LTE	Long Term Evolution	长期演进
MAC	Media Access Control	媒体接入控制
MAI	Multi-Address Interference	多址干扰
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service	多媒体广播和多播业务
MCC	Mobile Country Code	移动国家号码
MGW	Media GateWay	媒体网关
MI	Mobile Internet	移动互联网
MIMO	Multi Input Multi Output	多输入多输出技术
MME	Mobility Management Entity	移动性管理实体
MNC	Mobile Network Code	移动网号
MQAM	Multiple Quadrature Amplitude Modulation	多进制正交幅度调制
MR	Measure Report	测量报告
MSC	Mobile Switching Center	移动交换中心
MSIN	Mobile Station Identity Number	移动用户识别码
MSISDN	Mobile Subscriber International ISDN/PSTN Number	移动用户国际号码
MSK	Minimum Shift Keying	最小移频键控
MSRN	Mobile Station Roaming Number	移动台漫游号
MUD	Multi-User Detection	多用户检测
MW	Medium Wave	中波广播
NDC	National Destionation Code	国内目的地码
NTT	Nippon Telegraph & Telephone	日本电报电话公司
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用技术
OPEX	Operating Expense	运营成本
OSI	Open System Interconnect	开放式系统互联
OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor	正交可变扩频因子
PACCH	Packet Asscrchted Control CHannel	分组随路控制信道
PAGCH	Packet Access Grant CHannel	分组接人应答信道
PAPR	Peak to Average Power Ratio	峰均比
PBCCH	Packet Broadcast Control CHannel	分组广播控制信道
PBCH	Physical Broadcast CHannel	物理广播信道

PCCCH	Packet Common Control CHannel	分组公共控制信道
P-CCPCH	Primary Common Control Physical CHannel	主公共控制物理信道
PCF	Packet Control Function	分组控制功能
PCG	Project Co-ordination Group	项目协调组
PCH	Paging CHannel	寻呼信道
PCM	Pulse Code Modulation	脉冲编码调制
PCRF	Policy and Charging Rules Funciton	策略与计费规则功能
PCS	Personal Communications Service	个人通信服务
PCU	Package Control Unit	分组控制单元
PDSCH	Physical Downlink Shared CHannel	物理下行共享信道
PDSN	Packet Data Serving Node	分组业务数据节点
PDTCH	Packet Data Traffic CHannel	分组数据业务信道
PDU	Protocol Data Unit	协议数据单元
P-GW	PDN GateWay	PDN 网关
PHS	Personal Handy-phone System	个人手持式电话系统
PICH	Paging Indicator CHannel	寻呼指示信道
PPCH	Packet Paging CHannel	分组寻呼信道
PRACH	Physical Random Access CHannel	物理随机接入信道
PSC	Primary Synchronization Code	主同步码
PSK	Phase Shift Keying	相移键控
PSS	Primary Synchronizaiton Signal	主同步信号
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	正交幅度调制
QoS	Quality of Service	服务质量
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	正交相移键控
RACH	Random Access CHannel	随机接入信道
RAN	Radio Acess Network	无线接入网
RB	Resource Block	资源块
RC	Radio Configuration	无线配置
RE	Resource Element	资源元素
RLC	Radio Link Control	无线链路控制
RNC	Radio Network Controller	无线网络控制器
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制



RRU	Radio Remote Unit	无线远端单元
RS	Relay Station	中继站
SACCH	Slow Associated Control CHannel	慢速随路控制信道
SAE	System Architecture Evolution	系统架构演进
S-CCPCH	Secondary Common Control Physical CHannel	辅助公共控制物理信道
SCH	Synchronization CHannel	同步信道
SDCCH	Stand-alone Dedicated Control CHannel	独立专用控制信道
SDM	Space Division Multiplexing	空分复用
SDMA	Space Division Mutiple Access	空分多址
SFN	System Frame Number	系统帧号
SGSN	Servicing GPRS Support Node	GPRS 服务支持节点
S-GW	Serving GateWay	服务网关
SIM	Subscriber Identity Module	用户身份识别模块
SIR	Signal to Interference Ratio	信号和噪声的比值
SN	Subcriber Number	用户号码
SNR	Signal-to-Noise Ratio	信噪比
SNS	Social Network Site	社交网站
SON	Self-Organizing Network	自组织网络
SSC	Secondary Synchronization Code	从同步码
SSS	Secondary Synchronizaiton Signal	从同步信号
SUD	Single-User Detection	单用户检测
TA	Time Advance	时间提前量
TCH	Traffic CHannel	业务信道
TDM	Time Division Multiplexing	时分复用
TDMA	Time Division Multiple Access	时分多址
TD-SCDMA	Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access	时分同步码分多址
Telefonica	Telefónica of Spain	西班牙电话公司
TIA	Telecommunication Industry Association	美国电信工业协会
TM	Transparent Mode	透明模式
TMSI	Temporary Mobile Subscriber Identity	临时识别码
TSG	Technical Specification Group	技术规范组

TTA	Telecommunication Technique Association	（韩国）电信技术协会
TTI	Transmission Time Interval	传输时间间隔
UM	Unacknowledged Mode	非确认模式
UMB	Ultra Mobile Broadband	超移动宽带
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	通用移动通信系统
UpPTS	Uplink Pilot Time Slot	上行导频时隙
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network	UMTS 陆地无线接入网
VAD	Voice Activity Detection	话音激活检测
VLR	Visitor Location Register	拜访位置寄存器
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	宽带码分多址
WG	Work Group	工作组
Wi-Fi	Wireless Fidelity	无线保真（无线局域网）
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access	全球微波互联接入
WLAN	Wireless Local Area Networks	无线局域网

参考文献

References

[1]（美）ALAN V.Oppenheim 著．信号与系统（第 2 版）．刘树棠译．西安：西安交通大学出版社，1998．

[2]（美）Charles Petzold 著．编码的奥秘．伍卫国，王宣政，孙燕妮等译．北京：机械工业出版社，2004．

[3]（印）Atul Kahate 著．密码学与网络安全．邱仲潘等译．北京：清华大学出版社，2005．

[4] 樊昌信等．通信原理（第 5 版）．北京：国防工业出版社，2005．

[5]（美）John G.Prokis，Masoud Salehi 著．通信系统原理．李锵，关欣，杨爱萍，董健译．北京：电子工业出版社，2006．

[6]（美）Theodore S.Rapport 著．无线通信原理与应用．周文安，付秀花，王志辉等译．北京：电子工业出版社，2006．

[7] 啜钢等．移动通信原理与系统．北京：北京邮电大学出版社，2005.

[8] 丁奇．大话无线通信．北京：人民邮电出版社，2010．

[9] 张威．GSM 网络优化——原理与工程（第 2 版）．北京：人民邮电出版社，2010．

[10] 韩斌杰，杜新颜，张建斌．GSM 原理及其网络优化（第 2 版）．北京：机械工业出版社，2009．

[11] 孙宇彤，赵文伟，蒋文辉．CDMA 空中接口技术．北京：人民邮电出版社，2004．

[12] 孙宇彤．WCDMA 空中接口技术．北京：人民邮电



出版社，2011.
[13]（芬）Harri Holma，Antti Toskala 著．UMTS 中的 WCDMA——HSPA 演进及 LTE. 杨大成译．北京：机械工业出版社，2008.
[14] 高鹏，赵培，陈庆涛．3G 技术问答．北京：人民邮电出版社，2009.
[15] 左飞．大话 TD-SCDMA．北京：人民邮电出版社，2010.
[16] 酷哥尔．实战无线通信应知应会——新手入门，老手温故．北京：人民邮电出版社，2010.
[17] 华为技术有限公司．移动通信制式浅谈.
[18]（意）Stefania Sesia 等著．LTE——UMTS 长期演进理论与实践．马霓等译．北京：人民邮电出版社，2009.
[19] 沈嘉，索士强，全海洋等．3GPP 长期演进（LTE）技术原理与系统设计．北京：人民邮电出版社，2008.
[20] 中国经济网．http://www.ce.cn.
[21] 京东商城．http://www.360buy.com.
[22] Cisco 与华为技术网．http://www.vlan9.com.
[23] 微波射频网．http://www.wbsp.net.
[24] 中国制造网．http://www.made-in-china.com.
[25] 泰福特电子．http://gpsdsjk.uni86.net.
[26] 互动百科网．http://www.hudong.com.
[27] 贾双双．基于 LTE-A 的协同多点传输技术的研究．中国科技论文在线.
[28] 宋鹏光等．自组织网络技术在 LTE 中的应用．电信网技术．2010 年 12 月第 12 期.
[29] 华为技术有限公司．华为 Femto 整体架构介绍.
[30] 电信维基网．www.telewiki.cn.
[31] 3G 通信网．www.chn3g.cn.
[32] EDN 互动社区．http://www.ednchina.com.
[33] 飞思卡尔社区．www.freescaleic.org

欢迎加入

图灵社区

最前沿的IT类电子书发售平台

电子出版的时代已经来临。在许多出版界同行还在犹豫彷徨的时候，图灵社区已经采取实际行动拥抱这个出版业巨变。作为国内第一家发售电子图书的IT类出版商，图灵社区目前为读者提供两种DRM-free的阅读体验：在线阅读和PDF。

相比纸质书，电子书具有许多明显的优势。它不仅发布快，更新容易，而且尽可能采用了彩色图片（即使有的书纸质版是黑白印刷的）。读者还可以方便地进行搜索、剪贴、复制和打印。

图灵社区进一步把传统出版流程与电子书出版业务紧密结合，目前已实现作译者网上交稿、编辑网上审稿、按章发布的电子出版模式。这种新的出版模式，我们称之为“敏捷出版”，它可以让读者以较快的速度了解到国外最新技术图书的内容，弥补以往翻译版技术书“出版即过时”的缺憾。同时，敏捷出版使得作、译、编、读的交流更为方便，可以提前消灭书稿中的错误，最大程度地保证图书出版的质量。

最方便的开放出版平台

图灵社区向读者开放在线写作功能，协助你实现自出版和开源出版的梦想。利用“合集”功能，你就能联合二三好友共同创作一部技术参考书，以免费或收费的形式提供给读者。（收费形式须经过图灵社区立项评审。）这极大地降低了出版的门槛。只要你有写作的意愿，图灵社区就能帮助你实现这个梦想。成熟的书稿，有机会入选出版计划，同时出版纸质书。

图灵社区引进出版的外文图书，都将在立项后马上在社区公布。如果你有意翻译哪本图书，欢迎你来社区申请。只要你通过试译的考验，即可签约成为图灵的译者。当然，要想成功地完成一本书的翻译工作，是需要有坚强的毅力的。

最直接的读者交流平台

在图灵社区，你可以十分方便地写作文章、提交勘误、发表评论，以各种方式与作译者、编辑人员和其他读者进行交流互动。提交勘误还能够获赠社区银子。

你可以积极参与社区经常开展的访谈、审读、评选等多种活动，赢取积分和银子，积累个人声望。

ituring.com.cn